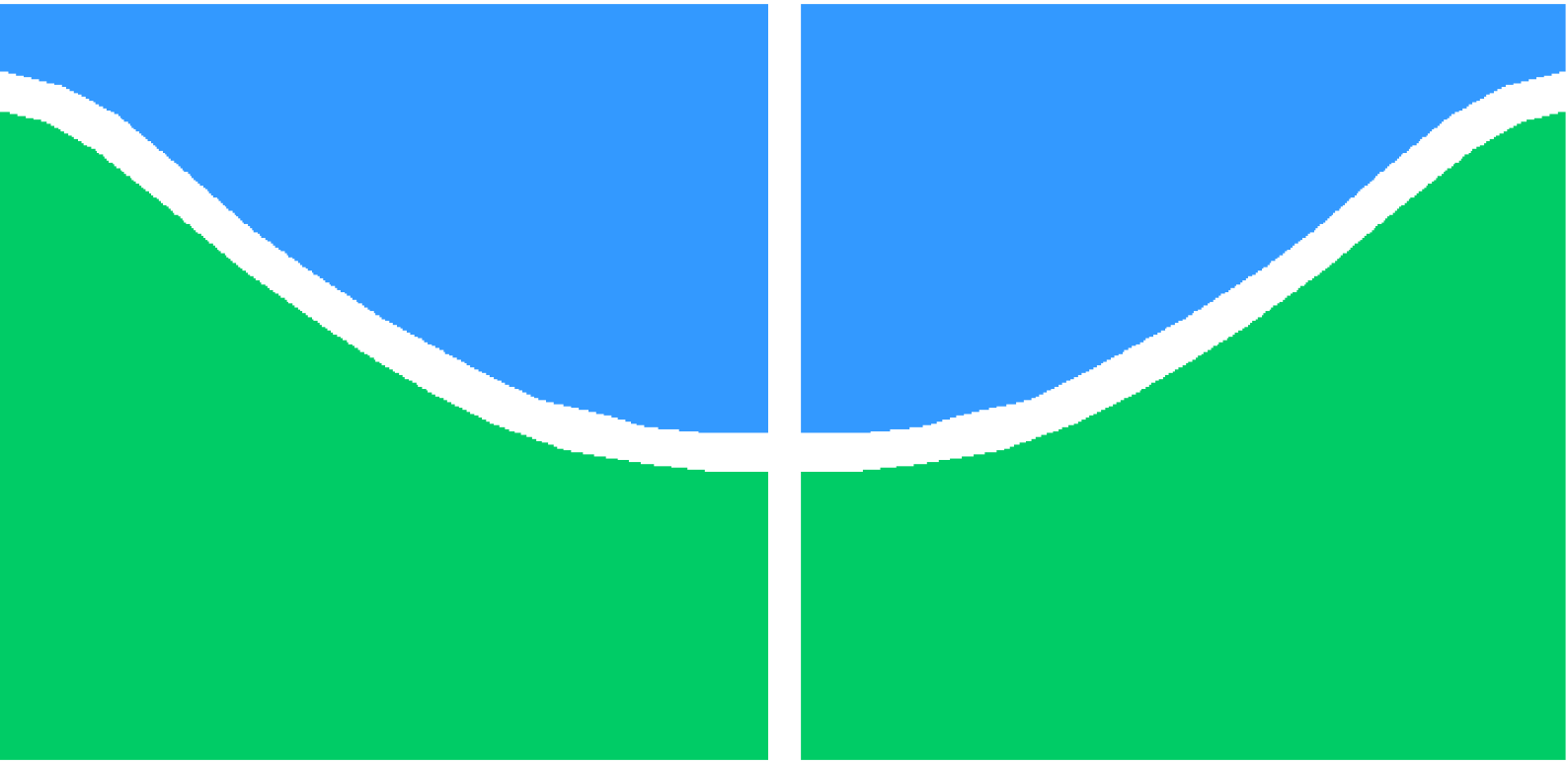


Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Engenharia Eletrônica

Título: Estudo e Implementação de uma Estratégia de Balanceamento Dissipativo para Baterias de Íons de Lítio

Autor: Felipe Andrade Maciel

Orientador: (Prof. Dr. Renato Vilela Lopes)

Brasília, DF

2025



Felipe Andrade Maciel

Título: Estudo e Implementação de uma Estratégia de Balanceamento Dissipativo para Baterias de Íons de Lítio

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: (Prof. Dr. Renato Vilela Lopes)

Brasília, DF

2025

Felipe Andrade Maciel

Título: Estudo e Implementação de uma Estratégia de Balanceamento Dissipativo para Baterias de Íons de Lítio/ Felipe Andrade Maciel. – Brasília, DF, 2025-

104 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: (Prof. Dr. Renato Vilela Lopes)

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2025.

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. (Prof. Dr. Renato Vilela Lopes). II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Título: Estudo e Implementação de uma Estratégia de Balanceamento Dissipativo para Baterias de Íons de Lítio

CDU 02:141:005.6

Felipe Andrade Maciel

Título: Estudo e Implementação de uma Estratégia de Balanceamento Dissipativo para Baterias de Íons de Lítio

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Eletrônica) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Eletrônica).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 12 de Dezembro de 2025:

(Prof. Dr. Renato Vilela Lopes)
Orientador

Prof. Dr. Marcus Vinicius Batistuta
Convidado 1

Prof. Dr. Rudi Henri Van Els
Convidado 2

Brasília, DF
2025

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me apoiam, bem como a todos aqueles que acreditam ser possível vencer na vida por meio dos estudos.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela saúde, paciência, discernimento e sabedoria concedidos ao longo de toda a elaboração deste trabalho.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional e por representar o pilar fundamental para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Agradeço à minha noiva, Lara Stefane, pela paciência, apoio e por acreditar em minha capacidade mais do que qualquer outra pessoa.

Aos meus amigos, agradeço pela motivação constante e por tornarem essa jornada mais leve e agradável, em especial a Jonathan de Jesus, Lucas Valme, Alisson Ravel, Daniel Ribeiro, Pedro Cotrim e Paulo Henrique.

Por fim, agradeço também ao meu orientador, Dr. Renato Vilela, pela confiança, orientação e pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

As baterias de íons de lítio (LIBs) têm assumido papel fundamental na transição energética global, especialmente por integrarem sistemas de armazenamento de energia (SAEs) de grande escala empregados em aplicações off-grid e em veículos elétricos e híbridos. Nesses sistemas, de centenas a milhares de baterias são associadas para armazenar grandes quantidades de energia. Entretanto, o desequilíbrio de estado de carga (SoC) entre as células associadas é inerente a esse tipo de conexão e resulta na redução da capacidade utilizável, aceleração do envelhecimento das baterias e comprometimento da segurança e eficiência operacional do pack. Este trabalho avalia a eficácia de uma estratégia de equalização dissipativa baseada em resistores de derivação comutados, aplicada ao balanceamento das LIBs associadas em série, com o objetivo de reduzir a dispersão de SoC entre as células. A metodologia foi desenvolvida em três etapas progressivas: (i) simulação computacional no *MATLAB/Simulink*; (ii) implementação experimental em bancada no modo *Software-in-the-Loop (SIL)* utilizando o *Simulink Desktop Real-Time*; e (iii) implementação final em sistema embarcado, com a lógica de controle programada no microcontrolador TMS570LS12x e integrada ao circuito de monitoramento BQ79616-Q1, aplicado a um pack 6S1P com células NCA-21700. Os resultados obtidos nas duas primeiras etapas demonstraram que, mesmo sob desbalanceamento moderado (diferença inicial de 20% em SoC), a capacidade utilizável do sistema pode ser reduzida em até 36,4%. Com a ativação do Sistema de Equalização de Cargas (SEC) proposto, foi possível recuperar aproximadamente 55,3% da autonomia do sistema após o balanceamento e a recarga das células, evidenciando a restauração do equilíbrio entre as células do pack de baterias. Na implementação embarcada, o SEC mostrou-se eficaz na redução da dispersão de SoC em três diferentes cenários de teste, alcançando valores finais de diferença máxima de 1,515% e desvio padrão de 0,36%. Os resultados obtidos validam a eficácia da estratégia dissipativa proposta na equalização de células de baterias de íons de lítio associadas em série, contribuindo diretamente para o aumento da autonomia, da segurança e da durabilidade dos sistemas de armazenamento de energia.

Palavras-chaves: Baterias de Íons de Lítio. Sistema de Equalização de Cargas. Balanceamento Dissipativo. Sistema de Gerenciamento de Baterias.

Abstract

Lithium-ion batteries (LIBs) have assumed a fundamental role in the global energy transition, especially by integrating large-scale energy storage systems (ESSs) used in off-grid applications and in electric and hybrid vehicles. In these systems, hundreds to thousands of batteries are connected to store large amounts of energy. However, state-of-charge (SoC) imbalance between connected cells is inherent to this type of connection and results in reduced usable capacity, accelerated battery aging, and compromised safety and operational efficiency of the pack. This work evaluates the effectiveness of a dissipative equalization strategy based on switched shunt resistors, applied to balancing series-connected LIBs, with the aim of reducing SoC dispersion between cells. The methodology was developed in three progressive stages: (i) computational simulation in MATLAB/Simulink; (ii) experimental implementation on a bench in Software-in-the-Loop (SIL) mode using Simulink Desktop Real-Time; (iii) final implementation in an embedded system, with the control logic programmed in the TMS570LS12x microcontroller and integrated into the BQ79616-Q1 monitoring circuit, applied to a 6S1P pack with NCA-21700 cells. The results obtained in the first two stages demonstrated that, even under moderate imbalance (initial difference of 20% in SoC), the usable capacity of the system can be reduced by up to 36,4%. With the activation of the proposed Load Equalization System (SEC), it was possible to recover approximately 55,3% of the system's autonomy after balancing and recharging the cells, evidencing the restoration of the balance between the cells of the battery pack. In the embedded implementation, the SEC proved effective in reducing the SoC dispersion in three different test scenarios, reaching final maximum difference values of 1,515% and standard deviation of 0,36%. The results obtained validate the effectiveness of the proposed dissipative strategy in equalizing lithium-ion battery cells connected in series, directly contributing to increased autonomy, safety, and durability of energy storage systems.

Key-words: Lithium-ion Batteries. Battery Equalization System. Dissipative Balancing. Battery Management System.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de célula de íons de lítio que pode ser considerada uma bateria 28
Figura 2 – Exemplo de bateria de chumbo-ácido com células que não podem ser consideradas baterias . . . 28
Figura 3 – Exemplo de pack de baterias automotivo constituído por 8256 células de íons de lítio cilíndricas . . . 28
Figura 4 – Estrutura interna célula de íons de lítio . . . 29
Figura 5 – Relação entre o *SoC* e *OCV* . . . 34
Figura 6 – Evolução do Fenômeno de Desequalização de Baterias de Íons de Lítio associadas em série. . . . 36
Figura 7 – Diferentes Métodos de Equalização de Baterias de íons de lítio . . . 37
Figura 8 – Circuito de Balanceamento com Resistor de Derivação Comutado. . . . 46
Figura 9 – Gráfico de variação de SoC em função da tensão em uma LIB. . . . 47
Figura 10 – Diagrama de Blocos dos Componentes Essenciais de Simulação . . . 50
Figura 11 – Células de LFP utilizadas para compor o pack de baterias. . . . 52
Figura 12 – *Battery (Table-Based)* Simulink . . . 53
Figura 13 – Visão geral do ambiente de simulação Simulink. . . . 54
Figura 14 – Fluxograma da lógica de chaveamento utilizada no balanceamento passivo. . . . 55
Figura 15 – Fluxograma de estados operacionais do sistema com balanceamento. . . 57
Figura 16 – Diagrama Bancada Experimental. . . . 62
Figura 17 – Foto de Visão Geral da Bancada Experimental. . . . 63
Figura 18 – Workstation. . . . 64
Figura 19 – Fonte Bi-direcional. . . . 64
Figura 20 – Câmara Térmica. . . . 65
Figura 21 – Placa de Aquisição de Dados. . . . 65
Figura 22 – Pack de Baterias 2S1P . . . 66
Figura 23 – Esquemático SEC . . . 67
Figura 24 – Placa do SEC desenvolvida em Laboratório . . . 68
Figura 25 – Diagrama da Integração Experimental . . . 69
Figura 26 – Foto da Integração do Pack de Baterias e SEC com a Bancada Experimental . . . 70
Figura 27 – Tela do *Simulink Desktop Real Time* . . . 70
Figura 28 – Circuito de Monitoramento e Equalização de Cargas BQ79616EVM . . 73
Figura 29 – Diagrama de Blocos Funcionais Chip BQ79616-Q1 . . . 74
Figura 30 – Microcontrolador TMS570LS12x . . . 75
Figura 31 – Construção Pack de Baterias 6S1P NMC-21700 . . . 76

Figura 32 – Pack de Baterias 6S1P NMC-21700 76
Figura 33 – Diagrama de Blocos Sistema Embarcado 77
Figura 34 – Foto SEC Embarcado 77
Figura 35 – Estimação do SoC Utilizando a Tensão de OCV 79
Figura 36 – Circuito de Equalização de Cargas BQ79616EVM 81
Figura 37 – Diagrama da Lógica Geral do SEC 83
Figura 38 – Diagrama da Lógica do Tempo de Balanceamento do SEC 84
Figura 39 – Simulação Balanceamento Desabilitado 89
Figura 40 – Simulação Balanceamento Habilitado 90
Figura 41 – Resultado Experimental Balanceamento Desabilitado 92
Figura 42 – Resultado Experimental Balanceamento Habilitado 93

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre diferentes tecnologias de baterias. 31
Tabela 2 – Correntes máximas de balanceamento em sistemas de equalização de cargas presentes em chips comercias BMS 39
Tabela 3 – Especificações do Computador 51
Tabela 4 – Principais especificações da célula $LiFePO_4$ utilizada no pack de baterias. 52
Tabela 5 – Principais parâmetros característicos da célula LFP-18650 obtidos experimentalmente. 53
Tabela 6 – Configurações de Simulação para o Teste 1 60
Tabela 7 – Configurações de Simulação para o Teste 2 60
Tabela 8 – Lista Geral de Materiais e Equipamentos Utilizados 61
Tabela 9 – Especificações Worksation 62
Tabela 10 – Descrição do Terminais da Bateria 2S1P 66
Tabela 11 – Descrição dos Conectores do Circuito do SEC 68
Tabela 12 – Lista Geral de Materiais e Equipamentos Utilizados na Implementação Embarcada 72
Tabela 13 – Tabela do Configuração do Tempo de Balanceamento de Cada Célula . 82
Tabela 14 – Condições Iniciais e Métricas de Dispersão - Teste 1 (Dispersão de SoC Alta) 86
Tabela 15 – Condições Iniciais e Métricas de Dispersão - Teste 2 (Dispersão de SoC Moderada) 87
Tabela 16 – Condições Iniciais e Métricas de Dispersão - Teste 3 (Dispersão de SoC Baixa) 88
Tabela 17 – Condições e Métricas de Dispersão Após o Balanceamento - Teste 1 (Dispersão de SoC Alta) 94
Tabela 18 – Condições e Métricas de Dispersão Após o Balanceamento - Teste 2 (Dispersão de SoC Moderada) 95
Tabela 19 – Condições e Métricas de Dispersão Após o Balanceamento - Teste 3 (Dispersão de SoC Baixa) 96
Tabela 20 – Análise dos Resultados Obtidos para o SEC Embarcado 97

Lista de abreviaturas e siglas

SoC	State of Charge (Estado de Carga)
SoH	State of Health (Estado de Saúde)
LIBs	Lithium-Ion Batteries (Baterias de Íons de Lítio)
BMS	Battery Management System (Sistema de Gerenciamento de Baterias)
SEC	Sistema de Equalização de Cargas
OCV	Open Circuit Voltage (Tensão de Circuito Aberto)
LFP	$LiFePO_4$ (Lítio Ferro e Fosfato)
VE	Veículo Elétrico
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo Híbrido Plug-In)
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Veículo Híbrido Elétrico)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
GPIO	General Purpose Input/Output (Entrada/Saída de Propósito Geral)
HPPC	Hybrid Pulse Power Characterization (Caracterização de Potência de Pulso Híbrido)
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy (Espectroscopia de Impedância Eletroquímica)
AHP	Analytic Hierarchy Process (Processo Hierárquico Analítico)
EKF	Extended Kalman Filter (Filtro de Kalman Estendido)
UKF	Unscented Kalman Filter (Filtro de Kalman Não Scentado)
ANN	Artificial Neural Network (Rede Neural Artificial)
PID	Proportional-Integral-Derivative (Proporcional-Integral-Derivativo)

Sumário

1 INTRODUÇÃO 21
1.1 Contextualização 21
1.2 Justificativa 23
1.3 Objetivos 24
1.3.1 Objetivo Geral 24
1.3.2 Objetivos Específicos 24
1.4 Estrutura do Trabalho 25

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 27
2.1 Conceitos Básicos sobre Baterias de Íons de Lítio 27
2.1.1 Funcionamento e Composição das Células 27
2.1.2 Comparativo entre Baterias de Íons de Lítio e Outras Tecnologias Eletroquímicas 30
2.1.3 Parâmetros Característicos 31
2.1.4 SoC (State of Charge) 33
2.1.5 SoH (State of Health) 34
2.2 Desequilíbrio em Células e suas Causas 35
2.3 Técnicas de Balanceamento 37
2.3.1 Balanceamento Dissipativo 37
2.3.2 Comparação com Balanceamento Não Dissipativo 38

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 41

4 ESTRATÉGIA DE BALANCEAMENTO PROPOSTA 45

5 METODOLOGIA 49
5.1 Descrição Geral da Metodologia 49
5.2 Implementação em Simulação 50
5.2.1 Materiais e Equipamentos Utilizados 51
5.2.2 Procedimento Experimental 51
5.2.2.1 Modelagem do Pack de Baterias 51
5.2.2.2 Ambiente de Simulação 53
5.2.2.3 Determinação da Resistência de Balanceamento 58
5.2.2.4 Análise Teórica do Desempenho Esperado 58
5.2.3 Condições e Configurações dos Ensaios 59
5.3 Implementação Experimental 60

5.3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados . . . 61
5.3.1.1 Descrição da Bancada Experimental . . . 61
5.3.1.2 Construção do Pack de Baterias 2S1P . . . 66
5.3.1.3 Desenvolvimento do Circuito do Sistema de Equalização de Cargas . . . 67
5.3.1.4 Integração dos Componentes com a Bancada . . . 69
5.3.2 Procedimento Experimental . . . 71
5.3.3 Condições e Configurações dos Ensaios . . . 71
5.4 Implementação em Sistema Embarcado . . . 71
5.4.1 Materiais e Equipamentos Utilizados . . . 72
5.4.1.1 Circuito Monitoramento Equalização de Cargas BQ79616EVM . . . 72
5.4.1.2 Microcontrolador Hercules TMS570LS12x . . . 74
5.4.1.3 Construção do Pack de Baterias 6SP1 . . . 75
5.4.1.4 Integração dos Componentes do Sistema Embarcado . . . 76
5.4.1.5 Desafios para a Implementação da Lógica de Controle Embarcada . . . 78
5.4.1.6 Determinação do SoC a partir da Tensão de OCV . . . 78
5.4.1.7 Estimação do Tempo de Balanceamento . . . 79
5.4.1.8 Lógica de Balanceamento adaptada e implementada em sistema Embarcado . . . 82
5.4.2 Procedimento Experimental . . . 85
5.4.3 Condições e Configurações dos Ensaios . . . 85

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . 89
6.1 Apresentação dos Resultados de Simulação . . . 89
6.1.1 Resultados da Simulação sem Balanceamento . . . 89
6.1.2 Resultados da Simulação com Balanceamento . . . 90
6.2 Discussão e Análise dos Resultados de Simulação . . . 91
6.3 Apresentação dos Resultados da Implementação Experimental . . . 92
6.4 Discussão e Análise dos Resultados da Implementação Experimental 93
6.5 Apresentação dos Resultados da Implementação em Sistema Embarcado . . . 94
6.6 Discussão e Análise dos Resultados da Implementação em Sistema Embarcado . . . 97

7 CONCLUSÕES . . . 99
7.1 Conclusões Gerais . . . 99

REFERÊNCIAS . . . 101

1 Introdução

1.1 Contextualização

As baterias de íons de lítio (LIBs) têm chamado bastante atenção nos últimos anos, o destaque é fruto dos esforços de grandes organizações mundiais em conter os efeitos do aquecimento global e substituir combustíveis fósseis como petróleo, gás natural e carvão mineral (MOHAMMADI; SAIF, 2023). A transição energética visa conduzir a humanidade para um futuro mais sustentável com a utilização de fontes de energia renováveis como a energia solar e eólica. No contexto da transição energética, as LIBs desempenham o papel de funcionar como um sistema de armazenamento de energia (SAE) de grande escala. Contudo, não é apenas para esses sistemas que essas baterias são importantes, tais baterias são fundamentais em diversos dispositivos eletrônicos, de menor escala, principalmente portáteis como laptops, smartphones, fones de ouvido sem fio, smartwatches, etc (CHEN et al., 2021). Nesses sistemas eletrônicos as LIBs determinam indiretamente características finais dos produtos como: tamanho, peso, potência, velocidade de processamento, autonomia de energia e segurança.

As LIBs são atualmente as mais populares e amplamente utilizadas em diversas aplicações. Essa ampla adoção se deve às suas características técnicas que as tornam mais vantajosas em comparação a outras tecnologias de baterias. Entre seus principais atributos destacam-se a alta densidade energética, o baixo peso (resultado do fato de o lítio ser o metal mais leve da tabela periódica), a baixa taxa de autodescarga, a elevada eficiência, a longa vida útil em termos de ciclos e a capacidade de suportar altas taxas de corrente durante os processos de carga e descarga.

Dada a sua superioridade e relevância em 2019, a Real Academia Sueca de Ciências atribuiu o Prêmio Nobel de Química para John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham e Akira Yoshino pelo desenvolvimento da bateria de íons de lítio (Nobel Prize Outreach, 2019), que começou em 1970 e resultou na primeira unidade comercializada em 1991 com a Sony (BLOMGREN, 2016).

Desde o lançamento do primeiro modelo comercial, o mercado de LIBs tem apresentado uma tendência de crescimento exponencial, principalmente na última década, em grande parte, devido ao aumento da demanda por veículos elétricos (VEs) e SAEs para fontes de energia solar e eólica, tais sistemas utilizam de centenas a milhares de LIBs associadas em pacotes (packs) de baterias com objetivo de armazenar grandes quantidades de energia (ULUCAN; BURAT, 2024).

No campo de geração de energia renovável, os SAEs de grande escala estão sendo

utilizados como reserva de energia para contornar os efeitos de sobrecarga nas redes de transmissão e distribuição de energia. A sobrecarga é uma consequência do aumento do número de unidades geradoras, principalmente de energia solar, que criam um fluxo reverso de energia no sistema elétrico nos momentos em que a geração não supera o consumo. A incompatibilidade entre os picos de geração e consumo em sistemas de energia solar fotovoltaica exige formas de estudo para mitigar os seus impactos, sendo esse o tema de estudo em pesquisas como a tese de mestrado de (FERREIRA, 2019) que apontam as baterias como a tecnologia mais promissora para a solução desse entrave.

Já no setor automotivo a demanda pelos VEs cresce como resultado de regulamentações mundiais cada vez mais exigentes para reduzir as emissões de carbono no setor de mobilidade e conter os efeitos do aquecimento global substituindo os veículos movidos a combustão por veículos de propulsão elétrica e híbridos (MOHAMMADI; SAIF, 2023).

A construção de SAEs de grande escala que são utilizados em VEs, PHEVs (Veículos Híbridos Plug-In) e bancos de baterias para sistemas off-grid de geração de energia solar e eólica é facilitada devido a versatilidade que as LIBs possuem de serem associadas em série e paralelo para constituir os packs de baterias que atendem os mais diversos requisitos de projeto para esses sistemas como tensão, corrente, potência, capacidade de armazenamento, peso e volume.

No entanto, a associação de LIBs em série introduz um efeito do desequilíbrio de carga entre as células, que pode ser atribuído a uma combinação de fatores internos e externos. Entre as causas internas destacam-se as variações na capacidade nominal, na resistência interna, na taxa de autodescarga e no perfil de tensão de circuito aberto (OCV) das células, decorrentes de imperfeições no processo de fabricação e das características intrínsecas dos materiais eletroquímicos ((WEICKER, 2013; LU et al., 2013; CAO; SCHOFIELD; EMADI, 2008)). Por outro lado, fatores externos como a não uniformidade nas correntes de carga e descarga, gradientes térmicos durante a operação e diferenças na profundidade de descarga também contribuem para acentuar a inconsistência entre as células ao longo do tempo ((DIAS, 2024)).

Essas diferenças, inicialmente pequenas, tendem a se amplificar com o tempo, levando a um desequilíbrio progressivo no estado de carga (SoC) entre as células, o que compromete o desempenho, a segurança e a vida útil do pack de baterias ((FENG et al., 2019; JOSSEN, 2006)). Durante os ciclos de carga e descarga, a célula mais carregada atinge o limite superior de tensão antes das demais, limitando a capacidade de armazenamento de energia. De maneira análoga, durante a descarga, a célula menos carregada atinge primeiro o limite inferior de tensão, antecipando a interrupção do fornecimento de energia ((ULUCAN; BURAT, 2024; WEICKER, 2013)).

O efeito do desequilíbrio de cargas entre as LIBs que constituem as associações em série de um pack de baterias é uma característica intrínseca e também uma grande

desvantagem. É tendo em vista o fenômeno de desequilíbrio de cargas presente nas LIBs que os sistemas de equalização de cargas (SEC) são desenvolvidos para integrar os packs de baterias. Esse sistema é um subsistema do sistema de gerenciamento de baterias (BMS) e é indispensável em qualquer SAE que possua mais de uma bateria de íons de lítio em série no pacote de baterias. Por vezes, o BMS e o SEC são tratados como sinônimos dada a importância da equalização das células para o funcionamento adequado das baterias. A ausência de um SEC em um pack de baterias resulta na redução da capacidade utilizável do sistema e pode acelerar o processo de degradação das células. A evolução do processo de desequalização das LIBs se dá de maneira lenta e gradual, no entanto, esse problema pode fazer com que um pack de baterias projetado para durar anos perda totalmente sua autonomia em alguns meses.

Para reduzir os efeitos do desequilíbrio células entre LIBs associadas em série, diferentes técnicas de balanceamento de carga são utilizadas na implementação dos SECs. Na literatura as técnicas de balanceamento são classificadas em métodos de **balanceamento dissipativos** e métodos de **balanceamento não dissipativos ou regenerativos**.

As estratégias não dissipativas, envolvem transferência ativa de carga via capacitores ou transformadores e oferecem elevada eficiência energética, mas são associadas a maior complexidade, custo e requisitos de espaço ((LU et al., 2013)). Já os métodos dissipativos, como o balanceamento resistivo, destacam-se pela simplicidade construtiva e robustez, sendo amplamente empregados em BMS, inclusive em muitos veículos elétricos ((WEICKER, 2013; LU et al., 2013)).

1.2 Justificativa

As LIBs são as baterias mais populares atualmente, prova disso está na ampla adesão desse tipo de bateria nas mais diversas aplicações, inclusive em sistemas que exigem grande confiabilidade, eficiência e segurança. Exemplos práticos envolvem a área automotiva como a construção de packs de grande escala para VEs e PHEVs, e a área de geração de energia limpa que necessita de grandes SAEs que armazenam a energia gerada por usinas eólicas e fotovoltaicas.

Independente da área em que as LIBs sejam empregadas, a associação em série dessas células é inevitável para compor os packs de baterias e atender os requisitos de tensão e capacidade estabelecidos para os sistemas. No entanto, ao realizar a associação em série dessas células, o efeito de desequilíbrio de cargas, intrínseco a esse tipo de conexão, prejudica a capacidade utilizável do sistema, acelera o envelhecimento das células e compromete diretamente a segurança e a eficiência operacional dos packs de baterias.

Nesse cenário, um SEC se torna indispensável para realizar o balanceamento adequado das LIBs em qualquer pack de baterias que possua células em série. Do ponto

de vista prático, a negligência de tal requisito implica em perdas de desempenho e aumento de custos com manutenção e substituição precoce. Ignorar esse problema significa comprometer a confiabilidade de aplicações que não admitem falhas, VEs, sistemas off-grid e bancos de baterias para suporte à rede elétrica. Por isso, soluções que tratem esse desequilíbrio não são opcionais.

Nesse contexto, o balanceamento dissipativo se destaca como uma solução eficiente do ponto de vista de viabilidade técnica e econômica. Apesar de dissipar energia na forma de calor, essa estratégia oferece vantagens decisivas: é simples, confiável, de fácil implementação e apresenta excelente custo-benefício. Devido a isso, é amplamente adotada em aplicações comerciais exigentes como a área automotiva.

Além dos benefícios do estudo técnico para a indústria energética, no âmbito acadêmico, este trabalho contribui para a compreensão aprofundada sobre LIBs, pack de baterias e sobre o efeito do desequilíbrio presente nas associações em série de LIBs. Ademais, o presente trabalho possibilita que por meio de um circuito simples de chaveamento para implementação da técnica do balanceamento dissipativo por meio de resistor de derivação comutado sirva como ponte para implementações técnicas mais avançadas do estudo, para trabalhos futuros da área de controle sejam utilizadas, como técnicas de controle preditivo que são pouco exploradas na literatura.

1.3 Objetivos

A partir da justificativa apresentada, considerando a necessidade de sistemas de equalização de carga em packs de baterias de íons de lítio, os objetivos deste trabalho são definidos a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar e implementar uma estratégia de balanceamento dissipativo para baterias de íons de lítio, de modo a promover a equalização do estado de carga das células associadas em série de forma eficiente, segura, economicamente viável e didática. Adicionalmente, a solução deve ser simples, de fácil implementação e servir como base para estudos futuros.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para viabilizar o objetivo geral, estabelecem-se como objetivos específicos:

- Utilizar o *Matlab/Simulink* para realizar uma implementação *Model-In-the-loop* (MIL) e avaliar a estratégia de balanceamento dissipativo baseada na utilização de resistores de derivação comutados em diversas situações de teste.

- Desenvolver um circuito de comutação simples, responsável pelo acionamento dos resistores de dissipação de cada célula, assegurando critérios de segurança e confiabilidade.
- Realizar a construção de packs de baterias, projetados especificamente para integração com o sistema de balanceamento proposto e realizaçao de testes.
- Integrar o pack de baterias e os circuitos do SEC ao *Simulink Desktop Real Time* para realizar a avaliação experimental firmware de controle em bancada utilizando um ambiente *Software-In-the-Loop* (SIL).
- Utilizar os resultados obtidos nas etapas anteriores para desenvolver um SEC com firmware embarcado em um microcontrolador.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão do tema, abordando conceitos relacionados às baterias de íons de lítio, seus parâmetros e estados, bem como o problema do desequilíbrio e suas causas, além das principais técnicas de balanceamento. A Seção 3 traz uma breve revisão bibliográfica do tema. A Seção 4 descreve a estratégia de balanceamento proposta. A Seção 5 detalha a metodologia empregada. A Seção 6 apresenta os resultados e as discussões. Por fim, a Seção 7 expõe as conclusões obtidas a partir do trabalho desenvolvido.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo é destinado a fornecer os conhecimentos teóricos necessários para que o leitor compreenda o assunto abordado no trabalho.

2.1 Conceitos Básicos sobre Baterias de Íons de Lítio

Antes de abordar o problema de desequalização presente nas baterias de íons de lítio associadas em série e suas possíveis soluções, é necessário compreender primeiro os aspectos de construção e funcionamento desses componentes que são apresentados ao longo da próxima seção.

2.1.1 Funcionamento e Composição das Células

A bateria é o produto de associações (conexões em série, paralelo ou ambas) de unidades eletroquímicas mais básicas denominadas como células, e são dispositivos capazes de armazenar energia e fornecer corrente elétrica, quando submetidas em um circuito elétrico (KUSIAK, 2016).

É comum que os termos célula e bateria sejam utilizados como sinônimos. Entretanto, neste trabalho, adota-se a seguinte distinção: célula é definida como a menor unidade eletroquímica capaz de armazenar energia, independentemente de estar ou não inserida em uma bateria. Sempre que uma célula possuir encapsulamento individual, essa poderá ser considerada também uma bateria, tomando o raciocínio inverso é possível concluir que, uma bateria só poderá ser considerada uma célula desde que o seu encapsulamento compreenda uma única célula. Já o termo pack de baterias, fica reservado a associação de baterias que possuam encapsulamentos individuais.

Dessa forma, as figuras a seguir são apresentadas com o objetivo de tornar a compreensão do leitor mais clara: A Figura 1, apresenta uma célula de íons de lítio com encapsulamento cilíndrico. Essa célula pode ser considerada também uma bateria, pois possui encapsulamento individualizado; Na Figura 2, é apresentada uma bateria automotiva de chumbo-ácido. Essas baterias são constituídas pela associação em série de 6 células eletroquímicas de 2 volts cada, totalizando 12 volts. Nesse exemplo, as células da bateria de chumbo ácido não podem ser consideradas baterias individuais, pois não possuem encapsulamento próprio e tão pouco a bateria pode ser considerada uma célula, pois é constituída por pela associação de 6 células em série.

Por fim, a Figura 3, ilustra um pack de baterias, mais especificamente o pack de baterias do Tesla *Model S*, fabricado pela Tesla. Esse pack de bateria é composto por

8256 células (baterias) de íons de lítio, associadas, similares as células apresentadas na Figura 1.



Figura 1 – Exemplo de célula de íons de lítio que pode ser considerada uma bateria

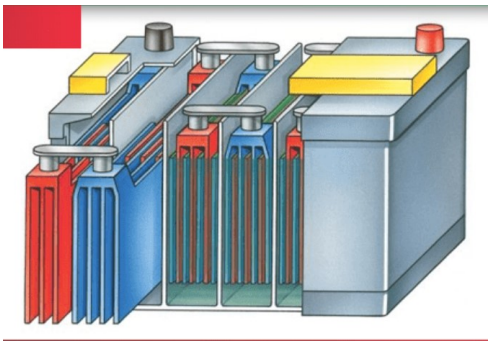


Figura 2 – Exemplo de bateria de chumbo-ácido com células que não podem ser consideradas baterias



Figura 3 – Exemplo de pack de baterias automotivo constituído por 8256 células de íons de lítio cilíndricas

As células de íons de lítio operam com os mesmos princípios eletroquímicos fundamentais que todas as outras baterias, reações redox, que são reações químicas na qual ocorrem a transferência de elétrons entre diferentes espécies químicas como átomos, íons ou moléculas ((WEICKER, 2013),(PLETT, 2015a)). As reações redox são algo cotidiano e estão presentes em processos como a queima de combustíveis, corrosão de metais, fotossíntese, respiração celular, etc.

As células de íons de lítio são constituídas por quatro componentes fundamentais: eletrodo positivo, eletrodo negativo, eletrólito e separador, cujas funções são descritas abaixo, de acordo com (PLETT, 2015a), e a estrutura simplificada é ilustrada pela Figura 4.

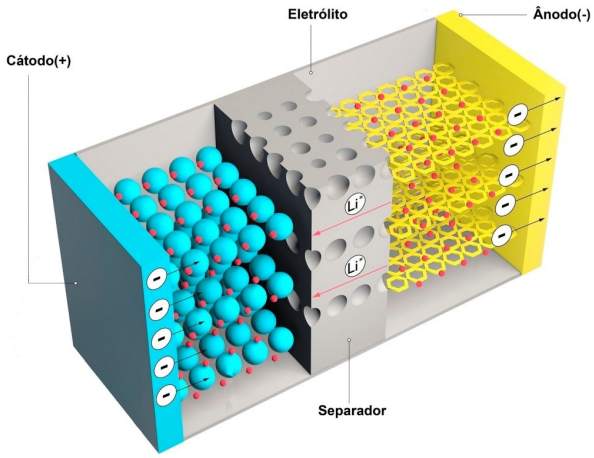


Figura 4 – Estrutura interna célula de íons de lítio

- Eletrodo negativo (ânodo): Na grande maioria das células comerciais de lítio o eletrodo negativo é formado por uma estrutura cristalina de carbonos, como o grafite C_6, dispostos em várias camadas. Esse tipo de estrutura permite que cada molécula de grafite comporte até um átomo de lítio por meio de forças Van der Waals, que são forças intermoleculares mais fracas que ligações químicas e permitem que os átomos e íons de lítio se movimentem no interior da estrutura cristalina durante os processos de carga e descarga da célula.

- Eletrodo positivo (cátodo): é o eletrodo onde a reação de redução ocorre, durante a descarga. Para que isso ocorra os elétrons saem do eletrodo negativo da bateria e atravessam o circuito elétrico e retornam para a bateria pelo cátodo. Durante o processo de recarga o cátodo realiza o processo inverso, ou seja, uma reação de oxidação que libera elétrons que retornam para o ânodo. Diferentemente do ânodo, o cátodo exige materiais que operem em uma alta faixa de potencial (maior que 3,5V) para que a bateria tenha uma alta tensão total e, consequentemente, alta densidade de energia. Para isso, diferentes óxidos metálicos são utilizados como matriz de

intercalamento para os íons de lítio. os diferentes óxidos metálicos utilizados no eletrodo positivo resultam em células com características diferentes de operação, sendo essa uma ampla área estudos. Os exemplos mais comuns de células comerciais são apresentados a seguir, cujas características são resumidas segundo (WEICKER, 2013):

  - $LiCoO_2$ (LCO): Alta densidade de energia, mas caro e menos seguro.
  - $LiFePO_4$ (LFP): Seguro e barato, mas com menor energia específica.
  - $LiMn_2O_4$ (LMO): Boa condutividade iônica, mas degrada com acidez.
  - $LiNiMnCoO_2$ (NMC) e $LiNiCoAlO_2$ (NCA): Tentam equilibrar energia, segurança e custo.

- Eletrólito: durante a operação da célula, os elétrons são transportados de um eletrodo ao outro por meio do circuito elétrico, enquanto isso, os íons de lítio se movimentam entre os eletrodos no interior da célula utilizando o eletrólito como meio de transporte. Ele é constituído por um sal, um ácido ou uma base dissolvida em um solvente. Como o lítio reage violentamente com a água, o eletrólito em uma célula de íons de lítio é composto de solventes orgânicos não aquosos mais um sal de lítio e atua puramente como um meio condutor iônico, não participando da reação química.

- Separador: é uma película de polímero poroso usada para separar os dois eletrodos, fornecendo uma barreira através da qual os íons de lítio podem passar. O separador atua como uma peneira e possui lacunas grandes o suficiente para permitir a passagem eficaz dos íons de lítio sem permitir a passagem das moléculas evitando curto-circuitos. Os materiais mais comuns utilizados são polietileno e polipropileno.

2.1.2 Comparativo entre Baterias de Íons de Lítio e Outras Tecnologias Eletroquímicas

As LIBs possuem tensão nominal mais elevada por célula, da ordem de 3,7 V, em contraste com os 1,2 V típicos de células NiCd e NiMH. Essa diferença proporciona maior densidade energética, reduzindo a necessidade de múltiplas células conectadas em série para atender aos requisitos de tensão em diversas aplicações (PLETT, 2015a).

Outro aspecto favorável é a baixa taxa de autodescarga. Células de íons de lítio apresentam perdas mínimas de carga ao longo do tempo, mesmo quando armazenadas por longos períodos, ao passo que células de NiCd e NiMH podem apresentar perdas diárias entre 1% e 5%, mesmo sem carga conectada (PLETT, 2015a).

Além disso, as LIBs possuem baixo "efeito memória", que afeta significativamente a capacidade útil de baterias NiCd e, em menor grau, NiMH. Aliado a isso, apresentam

elevada eficiência coulômbica, o que garante maior aproveitamento da energia armazenada a cada ciclo de carga e descarga (WEICKER, 2013). Esses fatores, em conjunto, explicam a crescente adoção da tecnologia em setores como mobilidade elétrica, armazenamento estacionário e dispositivos eletrônicos portáteis (LU et al., 2013).

Apesar dos benefícios, as LIBs possuem um custo de fabricação mais elevado em comparação com a demais químicas, pois requerem maior controle eletrônico, o que eleva a complexidade do sistema de produção. Além disso, sobre o ponto de vista operacional,as LIBs são sensíveis a sobrecarga e sobredescarga. Operações fora da janela segura de tensão podem comprometer irreversivelmente a integridade das células, exigindo circuitos de proteção capazes de desconectar a célula do sistema em situações anormais. Esse acréscimo de componentes eleva os custos e pode impactar negativamente a confiabilidade geral do sistema, especialmente considerando-se a possibilidade de falha dos próprios circuitos de proteção (PLETT, 2015a).

O gerenciamento térmico também é um ponto crítico. Como observado por (LU et al., 2013), a operação segura das LIBs está condicionada a faixas restritas de temperatura. Carregamento em temperaturas negativas ou superaquecimento pode levar à formação de dendritos metálicos, colapso da estrutura do eletrodo, emissão de gases e, em situações extremas, à fuga térmica (estado em que a bateria entra em combustão).

A fim de resumir as considerações feitas a respeito das LIBs e as demais células eletroquímicas mencionadas o seguinte quadro resumo, comparativo entre diferentes tecnologias de baterias 1, foi elaborado.

Tabela 1 – Comparativo entre diferentes tecnologias de baterias.

Característica	**Íons de Lítio**	**Chumbo-Ácido**	**NiMH**	**NiCd**
Tensão Nominal por Célula	∼3,7 V	2,1 V	1,2 V	1,2 V
Densidade Energética	Alta	Baixa	Média	Média
Eficiência Coulômbica	Alta	Média	Alta	Média
Autodescarga	Baixa	Alta	Média	Alta
Efeito Memória	Baixo	Não	Presente	Forte
Vida Útil	Longa	Curta	Média	Longa
Custo por Wh	Alto	Baixo	Médio	Médio
Complexidade de Gerenciamento	Alta	Baixa	Média	Média
Segurança Operacional	Crítica	Estável	Estável	Estável

Fonte: Adaptado de (PLETT, 2015a; WEICKER, 2013; LU et al., 2013).

2.1.3 Parâmetros Característicos

Como foi apresentado na seção anterior, as LIBs são componentes eletroquímicos bastante sofisticados e existe uma infinidade de possibilidades de combinação de formas de fabricação, elementos químicos utilizados, tamanhos e encapsulamentos. Cada variante

comercial resulta em diferentes características que impactam a dinâmica de funcionamento e a aplicação dessas células. Essa seção é dedicada a apresentação dos principais parâmetros característicos que envolvem as células de íos de lítio, além disso, são apresentados os principais estados de uma bateria durante o seu funcionamento.

Um dos primeiros parâmetros a ser observado em uma célula é a sua capacidade nominal de armazenamento de energia elétrica, quanto maior for a capacidade da célula mais tempo de autonomia um sistema conectado a ela possui. A unidade de capacidade é dada em Amperes-hora (Ah) ou sua fração miliamperes-hora (mAh). Esse parâmetro é o mais disseminado entre o público geral, prova disso são os catálogos de anúncios de smartphones, onde a capacidade da bateria do dispositivo normalmente é apresentada, pois impacta diretamente no processo de compra desse tipo de produto, já que o cliente está cada vez mais interessado em aparelhos com maior tempo de autonomia. Atualmente, um valor referência para esse tipo de dispositivo é de 5000 mAh.

Ao aprofundar-se no estudo de células de íons de lítio, por exemplo, em situações que há necessidade de realizar o dimensionamento de um pack de baterias para um drone, VE ou SAE, os parâmetros mais específicos de cada célula que vai compor a bateria se tornam mais relevantes e devem ser observados na folha de dados do fabricante correspondente. Como exemplo, é possível analisar os parâmetros pertinentes da célula de 4800mAh da Panasonic (Li-Polymer Battery Co., 2021).

As informações mais relevantes ao analisar a folha de dados de uma célula de lítio, além da própria química da célula e de sua capacidade, são suas especificações elétricas. Nas especificações de tensão é possível observar a tensão nominal da célula, e seus limites, como a tensão máxima que ela pode suportar durante a recarga e a tensão mínima que ela pode atingir durante o processo de descarga. Já entre as características de corrente, são disponibilizados os dados de corrente de carga máxima, corrente de descarga padrão e o limite de sobrecorrente durante a descarga que é o tempo máximo que a célula pode operar com a máxima corrente. Todos esses parâmetros devem ser analisados antes da utilização de qualquer célula de lítio, de forma a respeitar seus limites de operação e evitar que danos permanentes a célula.

Além disso, outras informações importantes podem ser apresentadas nas folhas de dados desses componentes, como: capacidade energética, energia específica, densidade energética, impedância interna e número de ciclos de operação da célula. A capacidade energética da célula é uma medida que está relacionada com a capacidade, no entanto, a capacidade é uma medida de carga é possui unidade de Amperes-hora (Ah) a capacidade energética é uma medida de energia e possui unidade de Watts-hora (Wh). A capacidade energética pode ser obtida a partir da multiplicação da capacidade com a tensão nominal da célula $Ah * V$=Wh. As medidas de energia específica e densidade energética mensuram a quantidade de energia por unidade de massa (Wh/kg) e a quantidade de energia por

unidade de volume (Wh/L), respectivamente, e são importantes em projetos nos quais o peso e o volume dessas baterias são determinantes para a aplicação, como VE e drones, por exemplo. Outra informação importante apresentada é o número de ciclos de operação que a célula pode executar até que sua capacidade reduza à 80% da capacidade inicial. Esse parâmetro está diretamente ligado ao estado de saúde (SoH) da célula e uma métrica para estimar quanto tempo a célula poderá ser utilizada antes que seja necessário substitui-la (LU et al., 2013). A medida que o SoH da LIB reduz, sua resistência interna aumenta, portanto, esse parâmetro pode ser utilizado como medida direta de SoH da LIB e valor típico para uma célula nova é apresentado na folha de dados do fabricante.

Os parâmetros descritos acima são consequência da química utilizada nas LIBs e das particularidades dos seus processos de fabricação. Ao utilizar a célula ou um conjunto de células em um pack de baterias dentro de uma aplicação surge a necessidade de realizar a estimação dos estados de funcionamento dessa bateria durante a sua operação. Os dois principais estados essenciais para a análise de funcionamento de uma LIB são o SoC (*state of Charge* - Estado de Carga) e SoH (*State of Health* - Estado de Saúde) (SANTOS et al., 2020), tais estados são detalhadas na subseções seguintes:

2.1.4 SoC (State of Charge)

O SoC é o estado mais importante a ser determinado em uma LIB, ele descreve a relação entre a capacidade nominal da bateria e sua capacidade residual restante. Esse estado funciona de maneira análoga à um monitor de combustível e informa, em porcentagem, o quanto de capacidade ainda há disponível na bateria. Dessa forma, um SoC de 100% representa uma bateria totalmente carregada e um SoC de 0% representa uma bateria totalmente descarregada (PLETT, 2015a).

O SoC é indispensável para dispositivos que utilizam baterias como fonte de energia principal. A determinação precisa do SoC é fundamental para o gerenciamento eficiente de sistemas de armazenamento de energia, especialmente em aplicações críticas como veículos elétricos, sistemas fotovoltaicos e equipamentos portáteis. Isso porque o SoC influencia diretamente a autonomia, a segurança, a vida útil e o desempenho da bateria.

Segundo (PLETT, 2015a) e (LU et al., 2013) o SoC pode ser determinado quantitativamente pela equação 2.1

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{1}{Q}\int_{t_0}^{t} \eta(\tau)\, i(\tau)\, d\tau \tag{2.1}$$

Conforme descrito na equação 2.1, o SoC no instante t, representado por $SoC(t)$, é obtido a partir de um valor inicial conhecido $SoC(t_0)$, subtraindo-se a carga fornecida ou absorvida pela bateria no intervalo entre t_0 e t. Essa carga é calculada pela integral da corrente $i(\tau)$, ponderada pela eficiência $\eta(\tau)$, e normalizada pela capacidade nominal

Q da bateria. Correntes positivas correspondem à descarga, enquanto correntes negativas indicam a carga da célula.

A implementação prática dessa equação para medição do SoC em uma bateria implica na utilização de um sensor de corrente de grande precisão, pois os erros de medição são acumulados ao longo do tempo de medição. Tal método é conhecido como contagem de coulomb e sua utilização está limitada aos períodos em que há fluxo de corrente. Outro método utilizado para obtenção do SoC que pode ser utilizado de maneira complementar ao método da contagem de coulomb é a implementação de *lookup tables* (Tabelas de Busca) que relacionam o OCV (Open Circuit Voltage - Tensão de Circuito Aberto) ao SoC. A relação entre o SoC e o OCV como pode ser observada pela Figura 5.

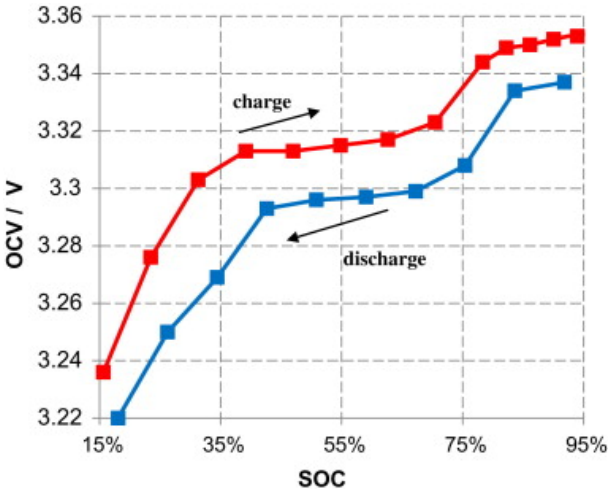


Figura 5 – Relação entre o SoC e OCV

O método OCV apresenta boa precisão, no entanto a obtenção do SoC a partir do OCV só é possível após longos períodos de repouso da célula, pois a corrente de difusão da LIB influencia no valores de OCV obtidos. Os dois métodos apresentados são utilizados como base para a implementação de métodos mais sofisticados que combinam os dados obtidos pelos métodos mais simples. Exemplos de algorítimos mais avançados para obtenção do SoC incluem a lógica Fuzzy, redes neurais, Filtro de Kalman, Filtro de Kalman Estendido e Filtro Adaptativo de Kalman (SOLíS, 2025).

2.1.5 SoH (State of Health)

Outro estado fundamental para as LIBs, é o SoH, ou estado de saúde, é uma métrica que quantifica a degradação de uma bateria ao longo do tempo, indicando o quanto sua performance atual se aproxima de sua condição original de fábrica. Em geral, o SoH é expresso como uma porcentagem, onde 100% representa uma bateria nova, e valores progressivamente menores indicam envelhecimento ou perda de desempenho. O parâmetro mais comum para definição do SoH é a capacidade disponível, sendo calculado como a

razão entre a capacidade atual e a capacidade nominal da bateria como apresentado pela equação 2.2. No entanto, outras definições podem considerar variações na resistência interna, na eficiência energética ou no tempo de resposta dinâmica da célula (LU et al., 2013).

$$\text{SoH} = \frac{C_{\text{atual}}}{C_{\text{nominal}}} \times 100\% \tag{2.2}$$

O principal objetivo do *SoH* é determinar o momento em que a LIB deve ser substituída. Em geral, valores de *SoH* inferiores à 80% indicam o fim da vida da LIB e é sugerido que a LIB seja substituída, devido ao seu comportamento instável (SANTOS et al., 2020).

Um exemplo prático e bastante conhecido de implementação de *SoH* é a Apple, que disponibilizam ao usuário final o estado de saúde *SoH* da bateria de seus smartphones de forma nativa e integrada ao sistema operacional. Essa funcionalidade, introduzida oficialmente no *iOS* a partir da versão 11.3, passou a fazer parte das configurações padrão dos iPhones, permitindo ao usuário visualizar a capacidade máxima da bateria em relação à capacidade nominal, bem como mensagens relacionadas à integridade do sistema de gerenciamento energético.

Apesar de não haver muitos exemplos de implementação de *SoH* em sistemas embarcados que utilizam as LIBs, é esperado que essa informação seja cada vez mais conhecida, divulgada e exibida por esses dispositivos, principalmente em VEs, PHEVs e HEVs, se tornando um ferramenta fundamental, durante a comercialização desses veículos usados. Em VEs, por exemplo, a bateria pode representar ate 40% do valor do automóvel (Deloitte, 2023), tornando sua avaliação indispensável em um processo de revenda.

2.2 Desequilíbrio em Células e suas Causas

A grande maioria das aplicações que necessitam de um sistema de armazenamento de energia, como os VEs, não conseguem ser supridas energeticamente por uma única bateria de lítio. Ao invés disso, são utilizadas associações dessas LIBs para atender os requisitos de tensão, corrente, potência e autonomia. Tais associações constituem os packs de baterias, e garantem que os mesmos modelos de LIBs sejam utilizados em diferentes aplicações, promovendo maior versatilidade.

No entanto, ao realizar a associação de células de íons de lítio em série para atender os requisitos de tensão dos sistemas, e constituir os packs de baterias essas células em série apresentam um fenômeno de desequilíbrio de carga entre elas (fenômeno que não ocorre nas células associadas em paralelo). Em outras palavras, a quantidade de energia disponível em cada célula diverge das demais ao longo dos ciclos de uso do pack de baterias (PLETT, 2015a).

A divergência entre as células pode ser causada tanto por fatores internos da célula que são resultado de pequenas divergências no processo de manufatura quanto por fatores externos como divergências de condutividade causadas nas conexões entre as células, não uniformidade no consumo de energia pelos componentes e gradientes de temperatura presentes nos packs (CAO; SCHOFIELD; EMADI, 2008). Apesar de todas as células estarem conectadas em série no pack e estejam sujeitas a mesma corrente durante o processo de carga e descarga e que as diferenças internas e externas sejam as menores possíveis esses SAEs operam por longos períodos de tempo de forma que ao longo do tempo a divergência entre a quantidade de energia disponível entre as células aumente (WEICKER, 2013).

A desequalização das LIBs pode ser melhor compreendida por meio da Figura 6, que ilustra o avanço desse fenômeno em um pacote de baterias simplificado constituído apenas por duas células em três estágios diferentes: no estágio A, as células se encontram no estado inicial no qual ainda não existem divergências no estado de carga entre as células; no estágio B, alguns ciclos depois, as células já apresentam uma pequena divergência; e no estágio C, muitos ciclos depois, as células apresentam total divergência no estado de carga. Dessa forma, após vários ciclos de carga e descarga é possível concluir que a grande divergência entre as células inviabiliza o uso do pack, pois tanto a carga quanto a descarga da bateria forçam as células a ultrapassar os limites seguros de funcionamento. Ao carregar o pack, a célula mais carregada ultrapassa a quantidade de energia que pode armazenar. Da mesma forma, ao tentar fornecer energia para uma carga, a célula mais descarregada descarrega-se abaixo do limite permitido. O fenômeno de desequilíbrio presente nos packs limita a autonomia da bateria e em casos extremos inviabiliza seu uso (PLETT, 2015a).

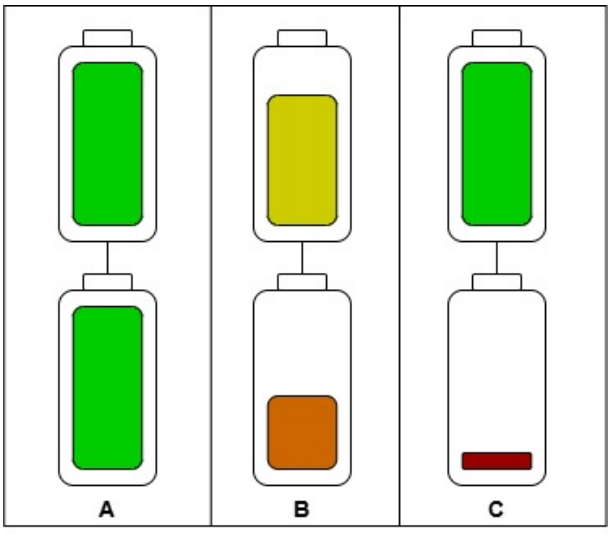


Figura 6 – Evolução do Fenômeno de Desequalização de Baterias de Íons de Lítio associadas em série.

2.3 Técnicas de Balanceamento

Existem diversas arquiteturas de circuitos de equalização descritas na literatura, PLETT, 2015b, divide essas estratégias em dois grupos principais, não dissipativo e dissipativo, como pode ser observado pela Figura 7. Os métodos não dissipativos tem o objetivo de controlar a distribuição de cargas entre as células desviando o excesso de carga de baterias mais carregadas para as baterias menos carregadas. Já a arquitetura de balanceamento dissipativo consiste em realizar a descarga das células mais carregadas utilizando um elemento resistivo, normalmente um resistor ou transistor. Dessa forma, é possível equalizar as células para convergirem para o estado de carga da célula com menos energia (PLETT, 2015a; WEICKER, 2013; LU et al., 2013).

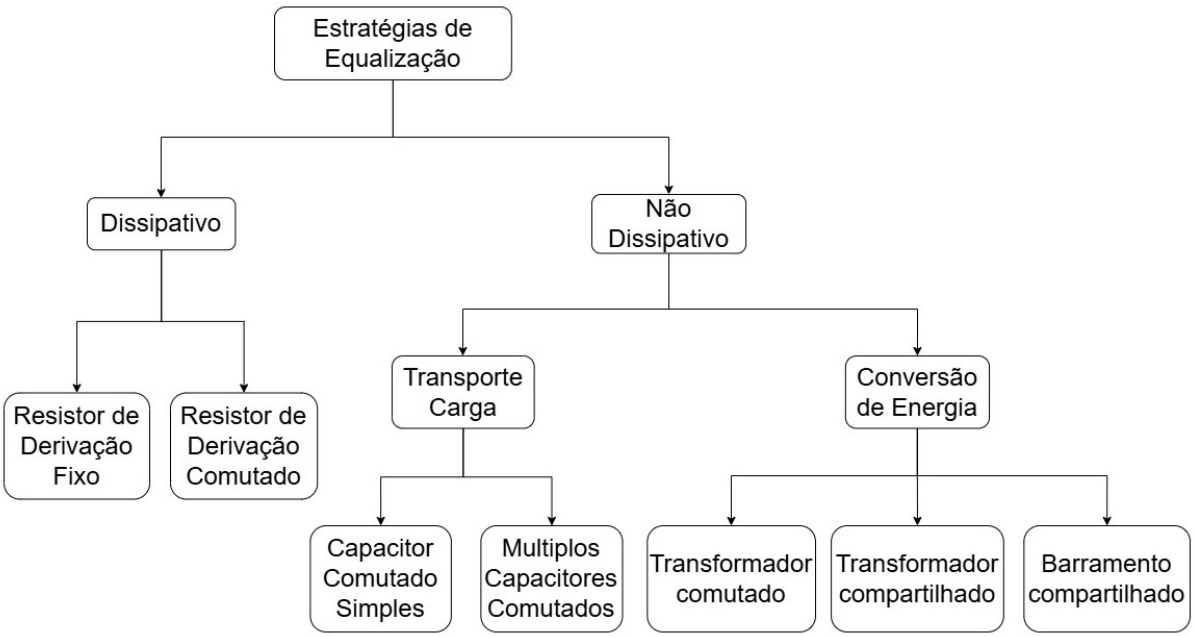


Figura 7 – Diferentes Métodos de Equalização de Baterias de íons de lítio

2.3.1 Balanceamento Dissipativo

Os métodos de balanceamento dissipativo são amplamente utilizados em aplicações comerciais como VEs. A Figura 7, apresenta duas técnicas, o resistor de derivação fixo e o resistor de derivação comutado. A primeira técnica consiste apenas em acrescentar um resistor, de valor igual, em paralelo para cada célula e não utiliza nenhuma técnica de controle, funcionando apenas pelo princípio da lei de Ohm. Nesse cenário, quando uma das células possui maior SoC que outra ela também possui uma maior tensão, resultando em uma maior taxa de descarga causada pela resistência em paralelo presente em seus terminais, dessa forma ao realizar a recarga do pack de baterias as células vão ser equalizadas ao longo da sua recarga. A aplicação desse método faz com que durante a recarga

as células sejam expostas a tensões acima das tensões nominais, limitando sua aplicação prática apenas para baterias de chumbo ácido ou Níquel Hidreto Metálico (PLETT, 2015a) (LU et al., 2013).

Ao incluir um dispositivo de chaveamento em série com o resistor é possível então, implementar diversas técnicas de controle, assim é possível controlar quais células vão ser balanceadas, estabelecer setpoints de balanceamento, controlar o tempo de balanceamento e evitar problemas de sobrecarga causados pelo excesso de carga, dando origem a segunda técnica de balanceamento dissipativo, apresentada na Figura 7. Esse circuito é apresentado no livro do (PLETT, 2015a) como resistor de derivação comutado e é o circuito mais simples, barato, versátil e de fácil implementação entre os circuitos de balanceamento de LIBs.

2.3.2 Comparação com Balanceamento Não Dissipativo

Os métodos de balanceamento não dissipativos ou regenerativos apresentam alta eficiência energética e conseguem redistribuir as cargas entre as células de maneira rápida e efetiva sem gerar grande dissipação de calor, o que não ocorre no balanceamento dissipativo. No entanto, tal método é pouco empregado em soluções comerciais de SECs que compõem os BMSs. A arquitetura dos circuitos de balanceamento não dissipativos normalmente incluem capacitores, conversores de corrente contínua (CC/CC) e transformadores, que são dispositivos que transferem energia elétrica entre circuitos, alterando os níveis de tensão e corrente. (LU et al., 2013), esses dispositivos fazem com que a aplicação desses métodos sejam mais caras, ocupem mais espaço e sejam de maior dificuldade de implementação.

O balanceamento não dissipativo também necessita de muitos dispositivos de chaveamento que normalmente são implementados com transistores MOS, esses componentes realizam a comutação entre diferentes células para realizar o trasporte de carga (para os circuitos com capacitores) ou a conversão de energia (para circuitos com transformadores). Para SAEs de grande escala o controle de muitos dispositivos de chaveamento que operam em níveis de tensão diferentes entre as células dificultam a sua implementação e elevam o custo agregado do sistema.

Embora as técnicas de balanceamento não dissipativas sejam mais rápidas e não apresentem desperdício de energia, essas vantagens, por si só, não são suficientes para viabilizar sua implementação prática em SECs utilizados em VEs, por exemplo. Além disso, ao realizar uma análise mais minuciosa do problema de desequalização das LIBs avalia-se que o principal fator responsável por esse fenômeno está na não uniformidade das taxas de auto-descarga entre as células presentes no pack de baterias.

As taxas de auto-descarga para baterias de lítio são as menores quando comparadas

com outras químicas de baterias, de 3% a 5% ao mês (LU et al., 2013), em decorrência disso, o processo de desequalização se torna bastante lento. De posse dessa informação, ao implementar um SEC dissipativo, como o método do resistor de derivação comutado, não são necessários sistemas de grande potência, pois pequenas correntes de balanceamento efetuadas de maneira gradual são suficientes para fazer com que o sistema retorne ao equilíbrio com baixa taxa de dissipação de energia.

A superioridade do balanceamento dissipativo em relação aos métodos não dissipativos pode ser observada no estado da arte dos BMS comercialmente oferecidos por fabricantes renomados e a sua utilização e SAEs de grande escala com VEs nos quais é necessário garantir segurança, confiabilidade e durabilidade mantendo o baixo custo. A tabela 2 ilustra exemplos de BMSs que utilizam o circuito de balanceamento de resistor de derivação comutado e suas correntes máximas de balanceamento, comprovando então que pequenas correntes de balanceamento são suficientes para corrigir os efeitos de desbalanceamento das baterias.

Tabela 2 – Correntes máximas de balanceamento em sistemas de equalização de cargas presentes em chips comercias BMS

Fabricante	Modelo (ASIC)	Corrente Máxima de Balanceamento
Texas Instruments	BQ79616	240 mA
Analog Devices	LTC6813	200 mA
Infineon	TLE9012	200 mA
STMicroeletronics	L9963E	200 mA

Fonte: Adaptado de (Texas Instruments, 2023a; Analog Devices, 2023; Infineon Technologies AG, 2023; STMicroelectronics, 2023).

Embora as técnicas de balanceamento não dissipativas apresentem grande potencial para aumentar a eficiência energética dos packs de baterias, sua aplicação prática ainda é limitada devido à maior complexidade de implementação e aos elevados custos associados. Dessa forma, considerando a ampla utilização dos métodos dissipativos, especialmente o circuito de balanceamento com resistor de derivação comutado, bem como sua simplicidade construtiva, robustez e viabilidade econômica, este trabalho adota essa estratégia como objeto de estudo.

3 Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo apresentar um panorama das principais contribuições científicas relacionadas às técnicas de balanceamento dissipativo em baterias de íons de lítio, destacando os métodos mais utilizados, suas vantagens e limitações, bem como identificar lacunas que motivam o presente estudo.

ARTHANAREESWARAN; LOGANATHAN (2023) apresentam uma estratégia de balanceamento passivo adaptativo aplicada a um arranjo de seis células Li-ion (3,6 V, 4 Ah) em MATLAB/Simscape. Os autores propõem selecionar dinamicamente o valor da resistência de derivação, utilizando dois resistores de derivação que podem ser combinados, com base em limiares de tensão de cada célula. Sob condições ideais de simulação, obtiveram redução de 34 % no tempo de balanceamento, 17 % na energia dissipada e 14 % na potência dissipada. A verificação experimental confirmou um tempo de balanceamento de aproximadamente 2 400 s e demonstrou também o impacto sobre o fator de degradação de capacidade do pack.

KOSEOGLOU et al. (2019) apresentaram um método de equalização baseado no uso de MOSFETs, paralelos a cada célula, funcionando como fontes de corrente controlável que ajustam a corrente de carga de cada célula individualmente. Um algoritmo avalia a tensão de cada célula e ajusta dinamicamente a tensão porta-fonte (do inglês, *gate-source*) do transistor para controlar a taxa de recarga da célula, resultando em equalização mais rápida e suave. Além disso, os valores de tensão de cada célula são utilizados em um algoritmo de estimação de SoH. Resultados experimentais comprovaram maior eficiência energética e menor dissipação de calor comparado ao método passivo tradicional, apesar de realizar a equalização apenas durante a recarga.

VITOLS (2014) desenvolveu um BMS com balanceamento dissipativo para um kart elétrico educacional, que atua durante o período de recarga, utilizando 20 células $LiFePO_4$ (3,2 V, 40 Ah). O controle é feito com base na tensão máxima de carregamento da célula e o resistor de derivação só é acionado quando esse valor é superado. A arquitetura inclui módulos de balanceamento dissipativos (escravos) montados nas células e uma placa central (mestre) para coleta de dados e comutação de resistores shunt.

SANTOS et al. (2018) implementaram um algoritmo de controle que atua sobre a corrente de recarga de cada célula, o estudo foca no gerenciamento energético otimizado durante o balanceamento. Com auxílio de um estimador de estado (Filtro de Kalman), células discrepantes, em valor de tensão, são detectadas e equalizadas de forma eficiente, resultando em menor geração de calor e redução do tempo total de balanceamento durante a recarga.

KARMAKAR; BOHRE; BERA (2023) procuraram otimizar o balanceamento dissipativo empregando um controlador PID projetado em ambiente *MATLAB/Simulink*. A variável de erro utilizada no PID é a diferença entre o SoC inicial antes do balanceamento e o SoC alvo. Comparado ao balanceamento passivo convencional, o método reduziu significativamente o tempo necessário para equalizar e melhorou a uniformidade de SoC entre as células, com menor dissipação de energia.

ISMAIL et al. (2017) propuseram utilizar, além do resistor de derivação, a resistência interna dos MOSFETs, reduzindo a necessidade de resistores externos de potência mais elevada com a divisão da potência entre os resistores de derivação e os MOSFETs que realizam a comutação. A técnica de controle empregada utiliza um valor de tensão de referência, próximo ao limite de tensão máximo da célula combinada com uma técnica de balanceamento durante a recarga. Aplicado a um pack de 15 células $LiFePO_4$ (200 Ah), o método demonstrou praticidade e ocupou menos espaço na placa, mantendo correntes de balanceamento adequadas.

KARMAKAR; BOHRE; BERA (2023) compararam diferentes controladores aplicados ao balanceamento passivo: PID e redes neurais artificiais (ANN) treinadas por diferentes algoritmos, utilizando o SoC como variável de controle. Em ambiente Simulink, o método ANN apresentou melhores resultados, reduzindo a corrente média de bleeding de 1,562 A para 0,203 A, a potência dissipada de 2,98 W para 0,084 W e a elevação de temperatura de 2,35°C para apenas 0,11°C.

O estudo de WU et al. (2022) propôs um sistema de equalização cooperativa multi módulos para packs de baterias de veículos elétricos, combinando técnicas de equalização não dissipativa e dissipativa. A arquitetura inclui descarga rápida via resistor de potência para acelerar o tempo de equalização entre módulos. Simulações e testes experimentais demonstraram maior eficiência no balanceamento em diferentes condições de desbalanceamento, além de ganho na capacidade disponível do pack e na segurança operacional.

Os autores DURAISAMY; KALIYAPERUMAL (2021), investigaram um método adaptativo de balanceamento dissipativo para aplicações em mobilidade elétrica, utilizando resistores de derivação controlados por tensão. Com modelo elétrico obtido por espectroscopia de impedância (EIS) e validação experimental, observaram que a estratégia consegue equalizar as células de modo simples e de baixo custo, ainda que apresente limitações no tempo de equalização e maior dissipação de energia em casos de alto desbalanceamento inicial.

KIVRAK et al. (2020) apresentou um BMS que realiza balanceamento dissipativo utilizando MOSFETs na região de triodo como resistências variáveis, eliminando a necessidade de resistores externos de potência. O controle foi implementado em microcontroladores STM32 e PIC para packs de quatro células $LiFePO_4$ de 40 Ah. Os testes demonstraram que a solução é viável, ocupa menos espaço e mantém correntes de equa-

lização seguras e eficazes.

O estudo experimental de WEI et al. (2017) analisou as características do balanceamento dissipativo em um string de quatro células $LiFePO_4$ (25 Ah), testando variações no limiar de disparo e na corrente de equalização. Constatou-se que reduzir o limiar e aumentar a corrente de equalização aumenta a eficiência, sobretudo na fase de descarga, considerada crítica para uniformizar o SoC, contribuindo para prolongar a vida útil das células.

Na tese de DIAS (2024), foi utilizado o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para escolher o método mais adequado de equalização, considerando critérios como custo, eficiência e impacto térmico. O AHP também foi embarcado como controlador digital em um módulo SEC, dissipativo, para testes práticos em uma bateria de empilhadeira elétrica (5,12 kWh). Os resultados mostraram que o AHP, como método de controle, pode tomar decisões em tempo real, adaptando o processo de equalização e melhorando segurança e durabilidade.

A dissertação de mestrado de FIGUEIRÓ (2015) desenvolveu dois algoritmos de balanceamento dissipativo para células $LiFePO_4$, formulados como rastreamento do SoC mínimo ou médio. Foi criado um modelo dinâmico de terceira ordem e realizadas estimativas de estado com filtros de Kalman (EKF e UKF). Experimentos demonstraram que os algoritmos reduzem o desequilíbrio de forma estável, mesmo com envelhecimento de células e ruídos de medição.

No trabalho de conclusão de curso de STRINGARI et al. (2020)desenvolveu-se um BMS com balanceamento dissipativo controlado por microcontrolador, projetado para aplicação em uma embarcação movida a energia solar. O projeto incluiu prototipagem e validação, monitorando tensão, corrente e temperatura para aumentar a segurança e prolongar a vida útil do pack. O protótipo demonstrou viabilidade técnica e robustez para aplicações de baixo custo.

Os trabalhos analisados demonstram avanços relevantes no aperfeiçoamento de técnicas de balanceamento dissipativo, incluindo a implementação de resistores variáveis implementados com transistores MOSFETs, controle de corrente ajustável e estratégias baseadas em estimadores de estado ou controladores inteligentes que consideram outros parâmetros como SoH das células. Tais contribuições confirmam o potencial de otimização dos métodos dissipativos, buscando reduzir perdas de energia, minimizar geração de calor e prolongar a vida útil dos packs.

Apesar disso, observa-se que grande parte dos estudos se concentra em soluções teóricas ou validações em ambiente simulado muito avançadas, sem fornecer detalhamento suficiente, o que dificulta a replicação prática por outros pesquisadores. Além disso, quando ocorrem validações experimentais, estas são, em geral, com escassa documentação

sobre integrações reais de hardware e interfaces de controle.

O presente trabalho contribui para literatura científica ao realizar uma apresentação didática a cerca do problema ao mesmo tempo que realiza a implementação de um sistema de balanceamento dissipativo simples, seguro e de fácil construção. A proposta visa preencher a lacuna didática identificada a cerca do tema, contemplando os aspectos teóricos, simulados e experimentais da técnica de balanceamento dissipativo com resistor de derivação comutado.

4 Estratégia de balanceamento proposta

Embora técnicas de balanceamento não dissipativas apresentem maior eficiência energética, estas demandam circuitos mais complexos, com maior custo e espaço ocupado, além de maior dificuldade de implementação prática em ambientes acadêmicos e protótipos experimentais. Assim, a escolha pelo método dissipativo justifica-se pela sua ampla aplicabilidade, facilidade de implementação e adequação ao objetivo deste trabalho, que visa desenvolver e validar um framework didático e funcional de equalização de células de baterias de íons de lítio.

O balanceamento dissipativo adotado neste trabalho é baseado na topologia de resistor de derivação comutado, uma das estratégias mais amplamente utilizadas em circuitos integrados comerciais de BMS, devido à sua simplicidade, robustez e baixo custo. Como mostrado na Figura 8, cada célula do pack está associada a um resistor de dissipação controlado por uma chave eletrônica dedicada. Essa chave permite ativar ou desativar o caminho resistivo de acordo com a lógica de controle definida.

Em circuitos integrados comerciais BMS as chaves comutadoras são implementadas utilizando transistores MOSFET dentro do circuito integrado do chip, já os resistores de balanceamento são resistores de potência que ficam situados na placa de circuito impresso (PCB) e podem contar com sistemas de arrefecimento para dissipação do calor gerado pela corrente de balanceamento caso seja necessário (Texas Instruments, 2023a; Analog Devices, 2023; Infineon Technologies AG, 2023; STMicroelectronics, 2023).

A topologia apresentada na Figura 8, é apontada como a mais relevante em termos de custo-benefício por diversos autores como (PLETT, 2015a; WEICKER, 2013; LU et al., 2013). A implementação dos comutadores que controlam, o acionamento dos resistores de balanceamento garantem ao projetista do SEC bastante versatilidade na elaboração das técnicas de controle de equalização das baterias.

O acionamento das chaves é determinado por um algoritmo embarcado no BMS, esse acionamento pode ser realizado, mais comumente, tomando como parâmetro o SoC ou tensão das células. Sempre que uma célula apresenta o SoC ou a tensão significativamente maior do que as demais, a chave correspondente é acionada, permitindo que o excesso de energia seja dissipado através do resistor de balanceamento. Esta atuação reduz gradativamente a diferença de carga, conduzindo o sistema para uma condição de maior uniformidade. Essa característica permite que o balanceamento ocorra de maneira gradual, sem necessidade de circuitos de alta potência ou dissipação de calor.

Neste trabalho optou-se por uma estratégia de controle mais simples, comutando os resistores de derivação com base na diferença de SoC entre as células, isso porque, a

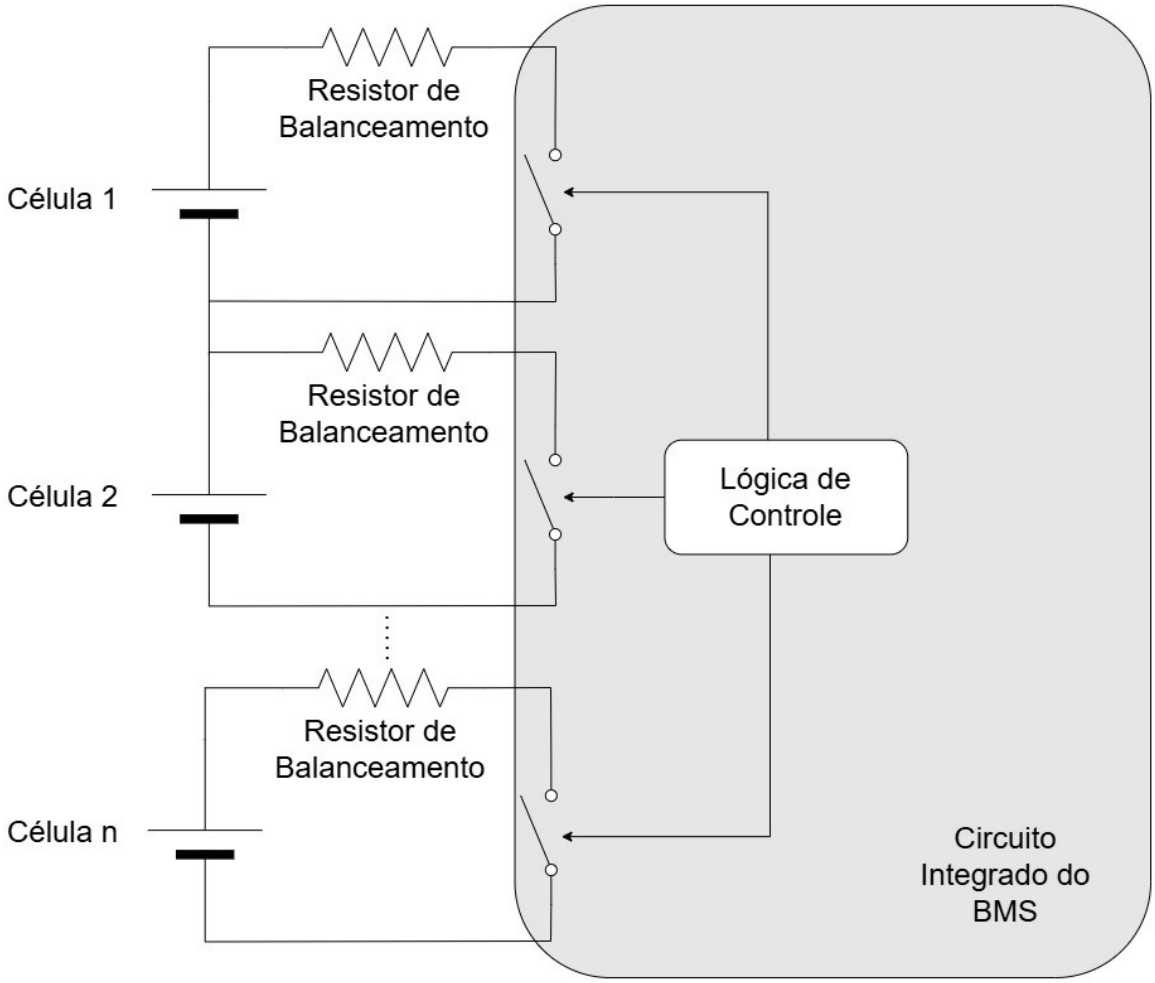


Figura 8 – Circuito de Balanceamento com Resistor de Derivação Comutado.

curva de tensão em função do SoC em LIBs apresenta trechos relativamente planos em grande parte da faixa de operação, principalmente em estados intermediários de carga, como ilustrado na Figura 9. Assim, diferenças reais de SoC podem não se refletir em variações claras de tensão, o que dificulta a detecção de desequilíbrios quando o controle é feito apenas pela leitura de tensão. Adicionalmente, os SECs são desenvolvidos para serem implementados como subsistemas complementares aos ao BMSs que já realizam a estimação do SoC de maneira prévia. Portanto, além de ser a variável de controle mais adequada, sua utilização pelo SEC não representa custos adicionais de infraestrutura ou firmware.

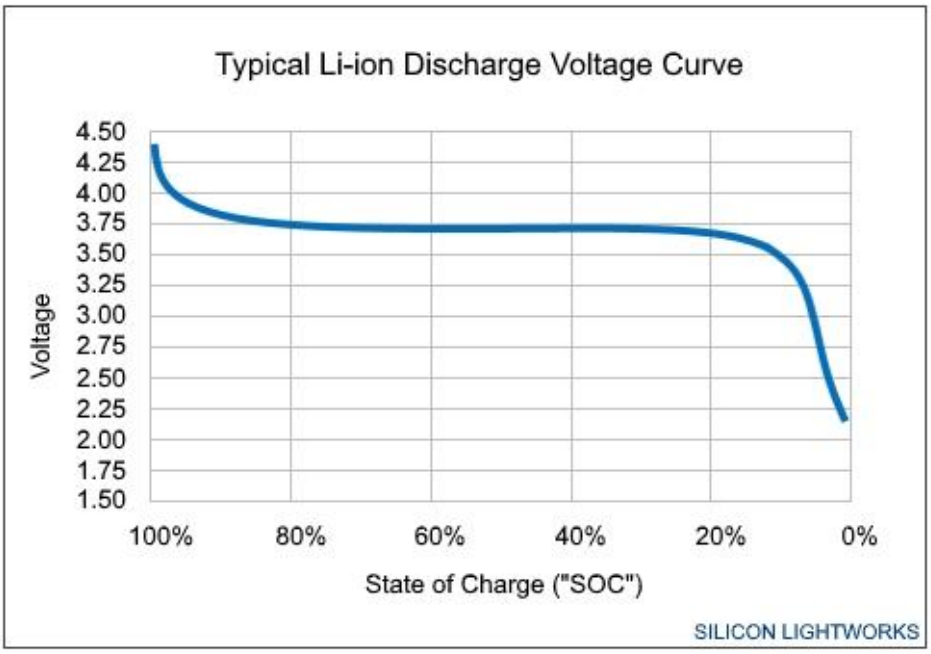


Figura 9 – Gráfico de variação de SoC em função da tensão em uma LIB.

Fonte:(Silicon Lightworks, 2024).

5 Metodologia

Este capítulo tem o objetivo de descrever de forma clara os procedimentos adotados para o desenvolvimento do trabalho, explicar os métodos utilizados e justificar as escolhas técnicas adotadas. Ademais, visa garantir a reprodutibilidade do estudo, de forma que, os resultados obtidos possam ser compreendidos, validados e eventualmente replicados por outros pesquisadores ou profissionais da área.

5.1 Descrição Geral da Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em três etapas principais: **Implementação em Simulação**, **Implementação Experimental** e **Implementação em Sistema Embarcado**. Cada etapa fornece resultados essenciais para a etapa subsequente, os quais são apresentados no Capítulo 6. Essa abordagem possibilita um desenvolvimento progressivo do trabalho, ao mesmo tempo que reduz as probabilidades de falhas de projeto.

Na primeira etapa, são desenvolvidos modelos matemáticos e computacionais no ambiente *Matlab/Simulink*, essa estratégia no contexto de desenvolvimento de sistemas de controle é denominada *Model-In-the-Loop* (MIL) e representa uma abordagem na qual tanto a planta quanto o algoritmo de controle são avaliados em um ambiente totalmente simulado. Essa etapa constitui a fase inicial do desenvolvimento de sistemas de controle. A implementação do ambiente de simulação permite estudar, testar e validar o método dissipativo de equalização do estado de carga (SoC) de baterias de íons de lítio em condições controladas e seguras. Os resultados obtidos são fundamentais para a implementação experimental realizada na etapa seguinte.

Na segunda etapa, a estratégia de controle validada em simulação é implementada e avaliada experimentalmente em bacada. Para realizar a validação experimental, todos os blocos que representam os elementos da planta de controle na simulação são substituídos por elementos reais, exceto a lógica de controle, que permanece em desenvolvimento e integrada ao ambiente *Matlab/Simulink*. Esse tipo de desenvolvimento, em sistemas de controle, é denominado *Software-In-the-Loop* (SIL). Essa abordagem permite avaliar se a lógica de controle implementada em simulação é capaz de proporcionar os mesmos resultados na prática, com componentes reais.

Por fim, na terceira etapa de desenvolvimento, após demonstrar os efeitos negativos do desbalanceamento entre células associadas em série presentes no pack de baterias de íons de lítio, bem como a efetividade da técnica de balanceamento proposta, é realizada a

implementação embarcada. Nessa fase, a lógica de controle desenvolvida é embarcada em um microcontrolador conectado a uma placa de desenvolvimento comercial para sistemas BMS.

5.2 Implementação em Simulação

A etapa de simulação consiste em modelar, simular e comprovar, a eficácia da estratégia de balanceamento dissipativo baseada na utilização de resistores de derivação comutados, conforme apresentado no capítulo 4, permitindo ilustrar os efeitos do desbalanceamento entre células e validar a eficácia da lógica de equalização proposta.

A avaliação do método em ambiente de simulação exige a modelagem de três componentes essenciais: um pack de baterias, com no mínimo duas células associadas em série, um sistema de equalização de cargas composto por uma lógica de controle e um circuito de balanceamento e uma fonte Bi-direcional de corrente, responsável por realizar a carga e a descarga do pack de baterias. O diagrama de blocos ilustrado pela Figura 10 apresenta os componentes necessários para a validação do método em simulação e também as conexões entre cada bloco.

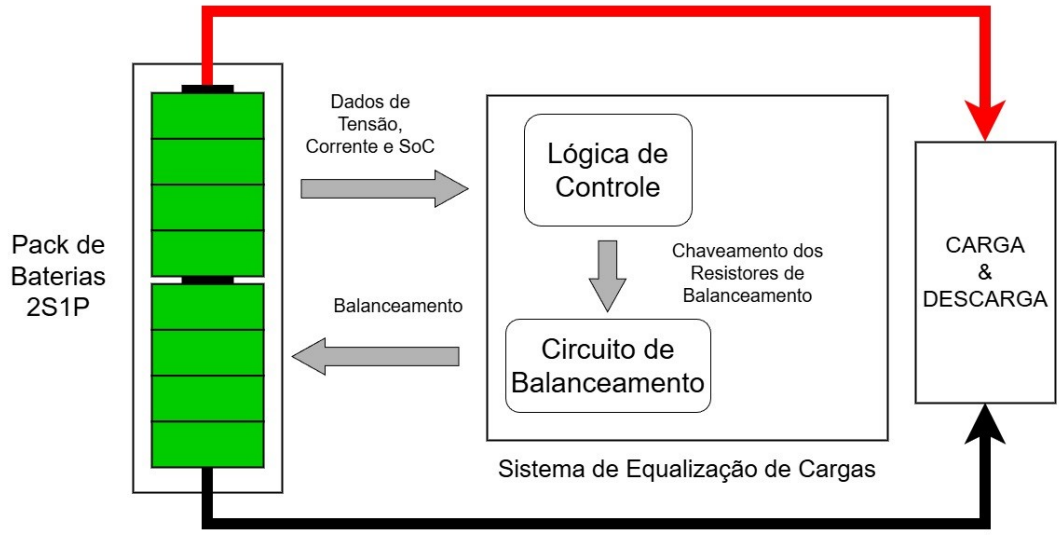


Figura 10 – Diagrama de Blocos dos Componentes Essenciais de Simulação

A partir do diagrama de blocos, é possível observar que o SEC deve receber os dados de tensão, corrente e SoC de cada célula do pack de baterias 2S1P e a partir desses dados ser capaz de implementar a lógica de controle que realiza a comutação do resistores de balanceamento presentes no circuito de balanceamento. Ademais, o SEC deve ser capaz de realizar a equalização das células mesmo em situações em que o pack de baterias está

submetido à correntes de carga ou descarga, ou seja, em situações de funcionamento normal do pack de baterias, não sendo necessário interromper o processo para realizar a equalização.

5.2.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

O equipamento necessário para o desenvolvimento da etapa de simulação foi um computador com o software *Simulink* previamente instalado. O *Simulink* é ambiente de modelagem gráfica do *Matlab*, e é amplamente utilizado na indústria em áreas de controle, modelagem de sistemas e processamento de sinais. A versão utilizada do programa é a R2024a. As especificações do computador utilizado são resumidas na tabela 3.

Tabela 3 – Especificações do Computador

Componente	**Especificação**
Processador	AMD Ryzen 5 5600H with Radeon Graphics 3.30 GHz
RAM instalada	8,00 GB (utilizável: 7,35 GB)
Armazenamento	477 GB SSD KBG40ZNS512G NVMe KIOXIA 512GB
Placa de Vídeo	NVIDIA GeForce RTX 3050 Laptop GPU (4 GB), AMD Radeon(TM) Graphics (496 MB)
Tipo de Sistema	Sistema operacional de 64 bits, processador baseado em x64

5.2.2 Procedimento Experimental

Nessa seção são apresentadas a etapas principais do desenvolvimento do ambiente de simulação e a construção dos subsistemas que a compõem.

5.2.2.1 Modelagem do Pack de Baterias

O pack de baterias modelado como objeto de teste para a validação do método de balanceamento em simulação é constituído por duas células de lítio, com a química $LiFePO_4$ (LFP), associadas em série. Essa é a menor configuração capaz de ilustrar tanto os efeitos do desequilíbrio quanto a eficiência do método utilizado. Além disso, a utilização de um pack de baterias com apenas duas células não apresenta prejuízo à generalização do conceitos discutidos, sendo igualmente válido para sistemas com mais células em série. Essa configuração facilita a visualização do comportamento dinâmico do sistema e a análise dos resultados obtidos. O modelo individual e real, das células que compõem o pack de baterias modelado é apresentado na Figura 11, e suas características pertinentes obtidas na folha de dados são resumidas pela Tabela 4.



Figura 11 – Células de LFP utilizadas para compor o pack de baterias.

Tabela 4 – Principais especificações da célula $LiFePO_4$ utilizada no pack de baterias.

Parâmetro	**Valor**
Química	$LiFePO_4$
Modelo	EP18650
Capacidade Nominal	1400 mAh
Tensão Nominal	3,2 V
Tensão de Carga Total	3,65 V
Tensão de Corte de Descarga	2,0 V
Corrente Máxima de Carga Contínua	1C (1,4 A)
Corrente Máxima de Descarga Contínua	5C (7,0 A)
Impedância Interna	35 mΩ
Faixa de Temperatura de Operação (Carga)	0–45 °C
Faixa de Temperatura de Operação (Descarga)	-10–60 °C
Peso Aproximado	40 g
Dimensões	Ø18,2 mm × 65,3 mm

Fonte: Adaptado de (Strema Baterias, 2025)

A preferência pela química LFP visa garantir que durante a etapa seguinte, de implementação experimental, os testes possam ser realizados de maneira mais segura, visto que essa química possui maior estabilidade térmica em relação as demais químicas de LIBs, reduzindo o risco de fuga térmica (incêndio) durante a realização dos testes. Adicionalmente, a capacidade reduzida de 1400 mAh das células permite que os ensaios sejam realizados em prazos mais curtos, comparadas com outras químicas que chegam a possuir 5000 mAh, com dimensões similares de célula. Essa escolha reduz o tempo de bancada no laboratório e possibilita a execução de múltiplos testes em sequência, sem comprometer a representatividade dos resultados.

A principal motivação para utilizar o *Simulink* está em sua ampla gama de bibliotecas disponíveis para modelagem de sistemas, dentre elas, a principal biblioteca utilizada

foi a *Battery*, disponível no pacote *Simscape* do ambiente *Simulink*, cujo principal elemento utilizado foi o bloco *Battery (Table-Based)*, ilustrado pela Figura 12.

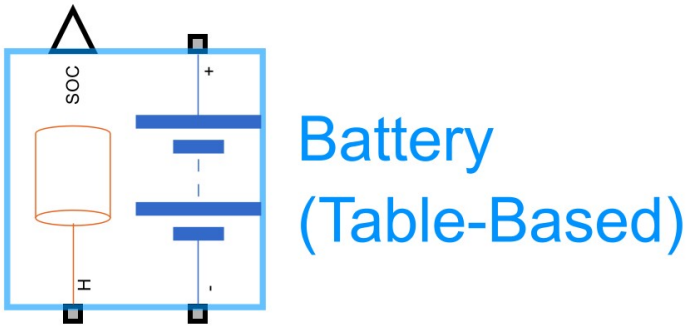


Figura 12 – *Battery (Table-Based)* Simulink

O modelo da célula de LFP, ilustrada pela Figura 11, foi implementado no bloco *Battery (Table-Based)*, parametrizado a partir de dados experimentais obtidos por meio de um processo de identificação conduzido previamente em laboratório, conforme descrito em SOLíS 2025. Essa abordagem permite representar com fidelidade o comportamento dinâmico da célula sob diferentes condições de operação, utilizando *Lookup-Tables* obtidas experimentalmente. Tal parametrização possibilita que a simulação reproduza o desempenho real da célula em regime dinâmico, contemplando variações de tensão em função do SoC, da temperatura e das correntes de carga e descarga. A tabela resumo 5 apresenta os principais parâmetros obtidos a partir da caracterização experimental da célula de lítio LFP-18650.

Tabela 5 – Principais parâmetros característicos da célula LFP-18650 obtidos experimentalmente.

Parâmetro	**Valor**
Capacidade Nominal	1490 mAh
Tensão Nominal	3,62 V
Impedância Interna	34 Ω

Fonte: Adaptado de (SOLíS, 2025)

5.2.2.2 Ambiente de Simulação

Após a configuração adequada do bloco *Battery (Table-Based)* com os dados de caracterização da célula, o ambiente de simulação é desenvolvido a partir do diagrama de blocos apresentado previamente na Figura 10, o qual reúne os elementos essenciais para a simulação. A estrutura geral do modelo implementado no software *Simulink* é apresentada na Figura 13, que ilustra uma visão geral do ambiente de simulação no *Simulink*.

Essa estrutura é organizada em quatro subsistemas principais: o subsistema de **Balanceamento**, o subsistema de Controle da **Fonte Bidirecional**, o subsistema do **Pack de Baterias** em conjunto com **Sistema de Equalização de Cargas** e o subsistema de **Determinação do SoC a partir do método do *Coulomb Counting***. Cada subsistema é descrito a seguir.

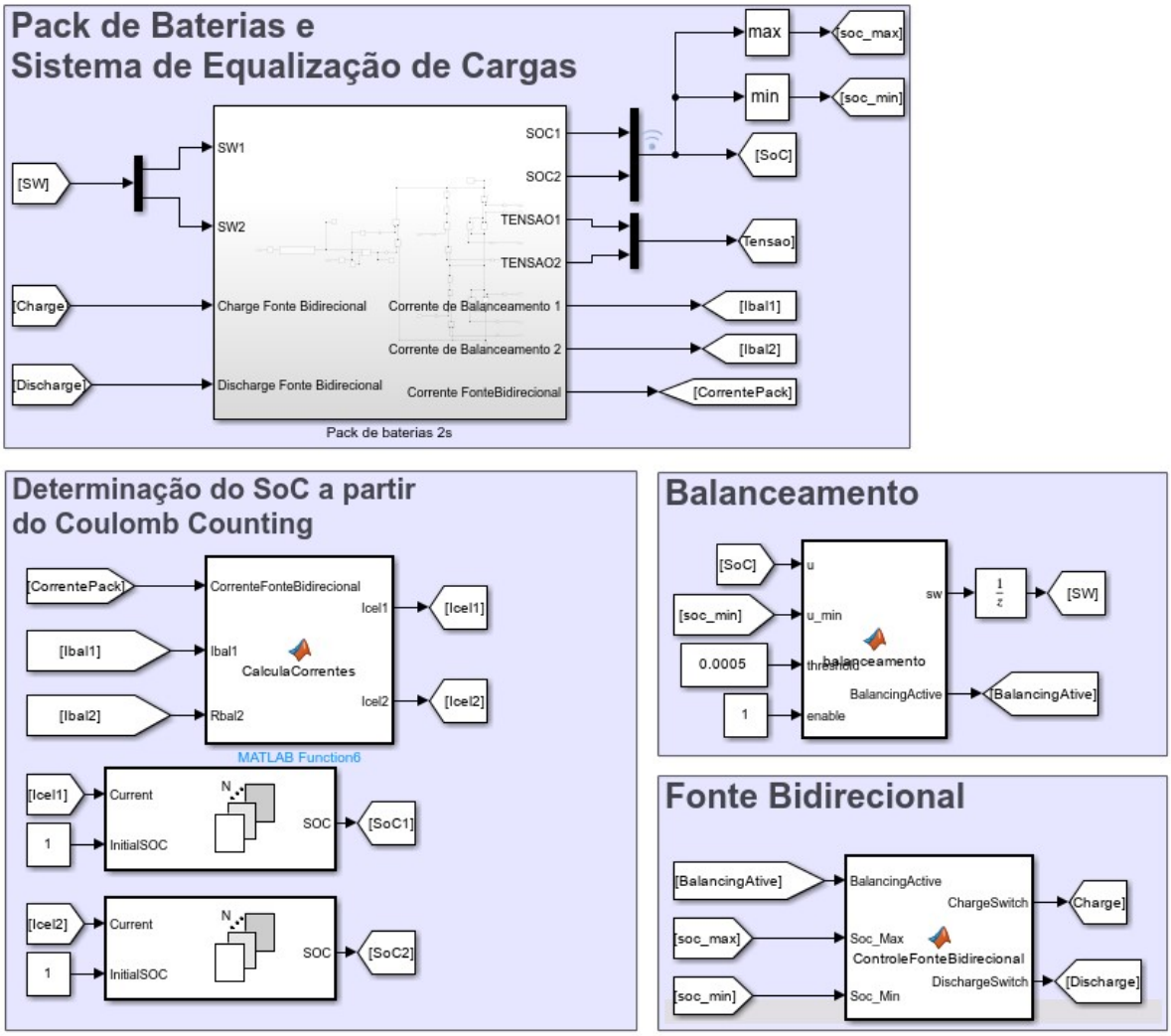


Figura 13 – Visão geral do ambiente de simulação Simulink.

O primeiro bloco a ser descrito é o bloco de **Balanceamento**, que é o bloco de controle principal da estratégia implementada. Este bloco é encarregado de emitir os comandos de comutação para os resistores de balanceamento a partir das informações de SoC de cada célula. A implementação da lógica de comutação foi realizada em linguagem de programação C, utilizando o bloco *Matlab Function*, no qual é possível elaborar qualquer função genérica. A lógica de controle é detalhada com o auxilio do fluxograma de código ilustrado na Figura 14.

Na Figura 14. é possível observar que o processo é executado de forma cíclica,

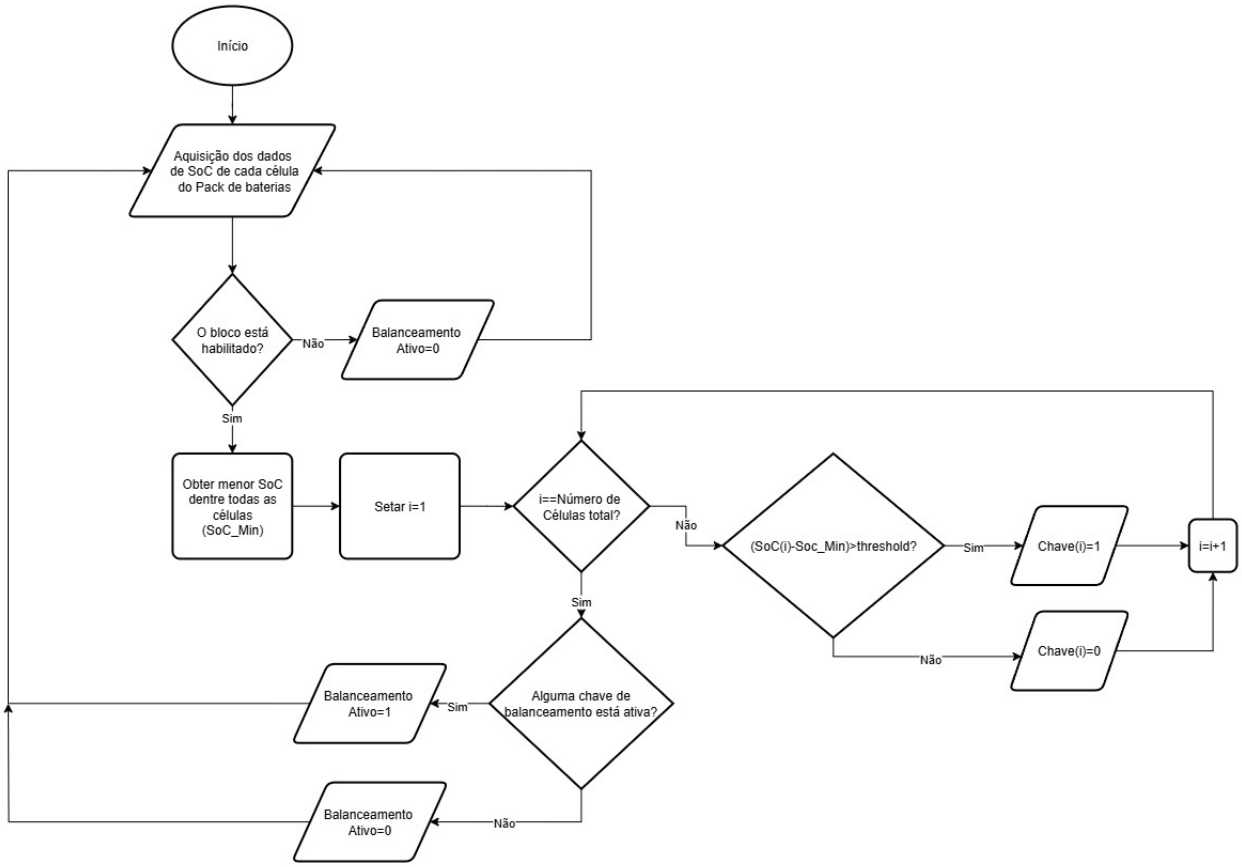


Figura 14 – Fluxograma da lógica de chaveamento utilizada no balanceamento passivo.

iniciando-se pela avaliação dos valores de SoC de todas as células do pack. Em uma etapa seguinte, verifica-se se o bloco de balanceamento está habilitado. Quando o balanceamento está ativo, a lógica prossegue com a equalização; caso contrário, nenhuma ação é tomada e o sistema permanece inativo. Em ambiente de simulação, o sinal de habilitação é utilizado para avaliar o comportamento do pack de baterias com e sem a atuação do balanceamento, sendo controlado manualmente pelo usuário. Já em implementações práticas, esse sinal pode representar um comando gerado pelo BMS, indicando o momento adequado, ou não, para realizar o balanceamento.

Quando o balanceamento está ativo, o algoritmo utiliza o menor SoC entre todas as células, denominado SoC_{Min}. A partir desse valor, é iniciado um processo de varredura sobre cada célula i do pack. Para cada uma delas, calcula-se a diferença $\Delta SoC_i = SoC_i - SoC_{Min}$. Se essa diferença for superior a um limiar pré-definido (threshold), que em simulação foi fixado com o valor de **0,05%**, um comando de acionamento é emitido para a chave associada à célula i ativando a ($Chave_i = 1$), conectando o resistor de balanceamento à célula e permitindo a dissipação da energia excedente. Caso contrário, a chave permanece desligada. Ao final da varredura, o sistema avalia se ao menos uma chave de balanceamento foi acionada. Se sim, o sinal *Balanceamento Ativo* é mantido em nível

lógico alto, indicando que o processo de equalização está em andamento. Caso contrário, esse sinal é desativado.

Diferentemente de abordagens que restringem a atuação do balanceamento ao processo de recarga, esta lógica permite a equalização independente do momento em que esteja a bateria, carregando, descarregando ou em repouso. Dessa forma, o sistema de equalização possuí total autonomia para realizar a equalização com base nos critérios estabelecidos e apresentados no fluxograma da Figura 14.

É importante ressaltar que a escolha do parâmetro *threshold* impacta diretamente no tempo de equalização, pois o sistema permanece ativo por mais tempo para atingir valores de diferença de SoC muito reduzidas. Em contrapartida, valores maiores de *threshold* reduzem o tempo necessário de equalização ao mesmo tempo que aumentam a tolerância de desequalização de cargas entre as células, reduzindo gradativamente a capacidade de armazenamento de energia pelo pack de baterias, representando um trade-off entre tempo de equalização e capacidade de armazenamento. Em aplicações práticas o valor de *threshold* não pode ser inferior a precisão da estimativa do SoC e recomenda-se que não seja superior 5%, valor comum de taxa de auto-descarga/mês em LIBs, principal referência de taxa de desequalização em células de íons de lítio.

O segundo subsistema que é ilustrado pela Figura 13, e deve ser detalhado é o subsistema do **Pack de Baterias** em conjunto com **Sistema de Equalização de Cargas**. o interior desse bloco é composto por dois blocos *Battery (Table-Based)*, que associados em série compõem o pack de baterias 2S1P, cujo o modelo das células é implementado conforme apresentado na seção 5.2.2.1. Ademais, esse bloco implementa os circuitos eletrônicos do SEC. Tais circuitos são compostos por uma chave comutadora e um resistor de balanceamento. Esse bloco recebe os comandos do bloco de **Balanceamento** para que a equalização das células seja realizada. Por fim, esse bloco emite os dados de tensão e corrente das células para os demais blocos.

Os dados de corrente individual de cada célula são utilizados no subsistema que realiza a determinação do SoC das células, cujo nome apresentado na Figura 13 é: **Determinação do SoC a partir do método do *Coulomb Counting***. Esse bloco é capaz de estimar estado de carga das células com base nas suas respectivas correntes de entrada e saída de cada célula. Esse método possibilita determinar, com precisão, a quantidade de energia armazenada em cada célula ao longo dos ciclos de operação.

O último subsistema utilizado que deve ser detalhado é o **Fonte Bidirecional**. Esse bloco é responsável por realizar os perfis de funcionamento do pack de baterias, ou seja, por conduzir os processos de carga e descarga, simulando condições reais de operação. Esse subsistema possibilita avaliar se o SEC é capaz de efetuar a equalização das células em diferentes situações de uso. Para simular os perfis de funcionamento uma máquina de estados é implementada internamente pelo bloco. Assim como o bloco de balanceamento,

a maquina de estados é implementada em lógica de programação C com o auxílio do *Matlab Function*.

A Figura 15 apresenta a máquina de estados implementada, que regula a transição entre os estados operacionais: Início, Carregamento, Equalização, Descarga e Fim. Nesta estrutura, o estado de Início é responsável pela maior parte das avaliações de transições de estado. A cada iteração do processo, o estado atual é determinado com base em condições lógicas associadas ao valor máximo e mínimo de SoC das células, à ativação do balanceamento e ao número de ciclos de testes executados.

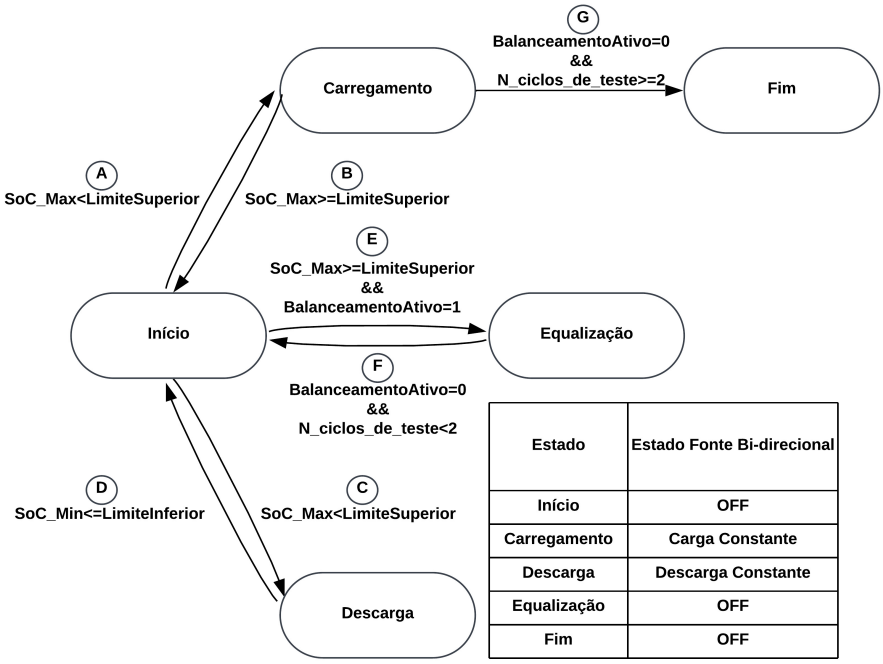


Figura 15 – Fluxograma de estados operacionais do sistema com balanceamento.

No estado de carregamento, a fonte Bi-direcional realiza a carga constante da bateria. Quando o SoC máximo atinge o limite superior e o balanceamento está ativo, o sistema transita para o estado de equalização, no qual a fonte Bi-direcional é desabilitada e os resistores de balanceamento são acionados conforme a lógica descrita anteriormente. Após a equalização, o sistema volta para o início, no qual realiza uma nova avaliação de qual deve ser o estado seguinte.

No estado de início, caso as baterias ainda não estejam completamente carregadas o sistema retorna para o estado de carregamento para finalizar a carga das baterias, mas caso estejam totalmente carregadas o próximo estado é a descarga, em que as células são descarregadas em corrente conste até o limite inferior de SoC. Dessa forma, vários ciclos de teste podem ser implementados e caso o número de ciclos de carga e descarga seja superior ao pré-determinado (2) o teste é finalizado. A tabela incorporada à Figura 15 resume as condições de operação da fonte Bi-direcional para cada estado da máquina de

estados.

5.2.2.3 Determinação da Resistência de Balanceamento

Por fim, após realizar o desenvolvimento de todos os subsistemas, e antes de realizar a simulação, é necessário determinar o valor da resistência de balanceamento. Para esse tipo de sistema de equalização de cargas o valor da resistência é o parâmetro mais importante a ser determinado, pois influencia na velocidade de balanceamento, na corrente do sistema, vida útil das células, dissipação de calor, corrente máxima suportada pelo comutador e dimensionamento de condutores. De acordo com XU; MEI; WANG 2019, embora não exista um valor único para a potência de dissipação de um circuito de balanceamento, adota-se como prática técnica em sistemas comerciais dimensionar a corrente de derivação em torno de 10% da capacidade nominal da célula, sendo essa uma faixa que representa equilíbrio entre eficiência e segurança. Correntes muito elevadas acelerarem o processo de equalização, contudo, aumentam a geração de calor e podem comprometer a vida útil das células, além de demandar componentes eletrônicos de maior porte e custo.

Na tese de doutorado de DIAS 2024, o mesmo critério de dimensionamento foi utilizado. Com base nos autores e considerando as características das células, apresentadas previamente, na subseção anterior pela tabela 4, o resistor de derivação foi dimensionado com o objetivo de drenar uma corrente de aproximadamente 10% da corrente nominal da célula de 1400 mAh, ou seja, 140mAh. O valor do resistor de balanceamento foi definido com base na relação $R = \frac{V}{I}$, considerando uma tensão máxima experimental da célula de aproximadamente 3,62 V e uma corrente de dissipação limitada a 0,1 C (cerca de 140 mA).

A partir dos dados, a equação 5.1 determina o valor da resistência de balanceamento necessária para satisfazer a condição desejada. Adicionalmente, a equação 5.2 determina a potência mínima, necessária de dissipação desse resistor.

$$R_{bal} = \frac{3,62}{0,1 \cdot 1,4} = 25.85\ \Omega \tag{5.1}$$

$$P = V \cdot I = 3{,}62 \cdot 0{,}14 = 0{,}50W \tag{5.2}$$

Tomando os valores comerciais disponíveis de resistores e os valores obtidos pelas equações 5.3 e 5.2 é possível determinar que o valor mais próximo disponível é de 27 Ω com uma potência igual ou superior a 1 W.

5.2.2.4 Análise Teórica do Desempenho Esperado

A partir do valor de resistência de 27 Ω e da tensão nominal de célula, apresentada na tabela 4, é possível obter a corrente de balanceamento média do circuito, $I_{bal}(med)$, com base na equação 5.3 :

$$I_{bal}(med) = \frac{V}{R_{bal}} = \frac{3{,}2}{27\Omega} = 118{,}5\ mA \tag{5.3}$$

Considerando a corrente de balanceamento, $I_{bal}(med)$ obtida, é possível estimar que essa corrente seja capaz de drenar 100% da capacidade da célula em 11,8 horas, pois, $T = \frac{1400mAh}{118{,}5mA} = 11{,}8h$. Consequentemente, considerando uma divergência máxima de 5% de SoC entre as células, Estima-se que o sistema seja capaz de realizar a equalização em aproximadamente 36 minutos de operação, conforme a equação 5.4, abaixo.

$$T = \frac{5\%}{100\%} \cdot 11{,}8h = 0{,}59h \tag{5.4}$$

Contudo, esse valor de tempo se trata de uma estimativa inicial, dado que a tensão da célula sofre alterações ao longo da sua operação, fato que pode ser observado na tabela 4, onde são apresentados os dados de tensão de carga total e tensão de corte de descarga como: 3,65 e 2,0 respectivamente.

Ao realizar uma análise dimensional sobre a velocidade de equalização do sistema, tomando novamente com referência a taxa de desequalização das LIBs de 5 %/mês, é possível concluir que a velocidade de equalização do sistema está bastante acima do necessário para aplicações comerciais, visto que o SEC é capaz de corrigir toda a desequalização de 1 mês em menos de uma hora. No entanto, os valores de corrente de balanceamento e resistência de balanceamento são adotados para fins didáticos, tendo em vista a validação do método em bancada experimental, no qual valores muito superiores de duração do experimento podem tornar o tempo em bancada inviável. Em um cenário de implementação comercial, o valor de corrente de balanceamento para esse sistema poderia ser drasticamente reduzido em detrimento da otimização de dissipação de calor do sistema e redução de tamanho e potência dos componentes.

5.2.3 Condições e Configurações dos Ensaios

A partir do modelo de simulação desenvolvido, foram considerados dois cenários de teste, o primeiro teste foi realizado com o **balanceamento desabilitado** e o segundo teste com o **balanceamento habilitado**. Em ambos os casos, a carga e a descarga das células foi realizada com corrente constante de 1C, correspondente a 1,4 A. Em todos os testes a faixa de operação das células foi de 35% à 90% para evitar sobrecargas e sobredescargas.

- **Teste 1 – Sem balanceamento:** o sistema é submetido a ciclos de carga e descarga com uma diferença inicial de SoC de 20% entre as células, sendo considerado um SoC inicial de 70% para a célula 1 e de 50% para a célula 2. Neste cenário,

o balanceamento permanece desativado. O objetivo é evidenciar os efeitos do desbalanceamento na capacidade utilizável do pack. A tabela 6 resume as principais configurações adotadas na simulação.

Tabela 6 – Configurações de Simulação para o Teste 1

Parâmetro	**Valor**
Balanceamento	Desabilitado
Diferença de SoC entre as células	20%
SoC célula 1	70%
SoC célula 2	50%
Faixa de operação de SoC das células	35% (SoC_{min}) à 90% ($SoC_{\text{máx}}$)
Corrente de recarga	1400 mA
Corrente de descarga	1400 mA
Tempo da simulação	3 Horas
Taxa de amostragem dos blocos no Simulink	10 ms

- **Teste 2 – Com balanceamento:** o sistema é simulado com a lógica de balanceamento habilitada, a fim de avaliar o comportamento do pack e a atuação da estratégia de equalização passiva em condições de desbalanceamento entre as células. A tabela 7 resume as principais configurações adotadas na simulação.

Tabela 7 – Configurações de Simulação para o Teste 2

Parâmetro	**Valor**
Balanceamento	Habilitado
Diferença de SoC entre as células	20%
SoC célula 1	70%
SoC célula 2	50%
Faixa de operação de SoC das células	35% (SoC_{min}) à 90% ($SoC_{\text{máx}}$)
Corrente de recarga	1400 mA
Corrente de descarga	1400 mA
Tempo da simulação	6 Horas
Taxa de amostragem dos blocos no Simulink	10 ms

Os resultados obtidos em ambiente de simulação para os dois cenários ilustrados acima são apresentados na seção de "Discussão e Resultados Parciais" 6.1.1.

5.3 Implementação Experimental

Embora a simulação computacional forneça uma base consistente para ilustrar o problema de desequalização das LIBS em packs de baterias, e sua implementação permita a avaliação da efetividade do método de balanceamento dissipativo, somente a aplicação prática permite confirmar o se o método estudado é capaz de proporcionar os mesmos resultados de simulação em condições reais de operação.

Nessa fase de desenvolvimento, é necessário que a lógica de controle do balanceamento, testada previamente em simulação, receba como entrada sinais reais, provenientes de um pack de baterias real. Além disso, os sinais de controle gerados pelo bloco devem ser utilizados para realizar o acionamento de resistores de balanceamento reais associados a essas baterias.

5.3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

Essa seção apresenta os materiais e equipamentos utilizados durante o desenvolvimento da implementação experimental em laboratório. Adicionalmente, a tabela 8 resume a lista geral de materiais e componentes utilizados.

Tabela 8 – Lista Geral de Materiais e Equipamentos Utilizados

Materiais e componentes	**Marca**	**Modelo**
Computador	ecZAP	Workstation
Placa de Aquisição de Dados	National Instruments	SCB-68A
Fonte Bi-Direcional	ITECH	IT-M3912C
Câmara Térmica	SolidSteel	40 Litros
Fonte de Alimentação DC	Minipa	MPL-3305M
Carga Eletrônica DC	East Tester	ET5410A+
Células	EXPOWER	$LiFePO_4$-18650

5.3.1.1 Descrição da Bancada Experimental

A realização dos ensaios práticos, necessários para a comprovação da eficácia do método de balanceamento, em condições reais de operação, exige um laboratório equipado adequadamente para realizar testes com baterias de íons de lítio. A UnB (Universidade de Brasília), no campus FCTE (Faculdade de Ciências Tecnologia e Engenharia), possui um laboratório destinado a esse tipo de aplicação, e nele são realizados diversos tipos de testes envolvendo: caracterização de baterias; desenvolvimento de algoritmos de estimação de SoC, SoH e SoF; e também algoritmos de controle para sistemas BMS. Por ser adequado, tal laboratório foi utilizado para essa etapa de desenvolvimento do trabalho.

O diagrama de blocos, ilustrado pela Figura 16, apresenta os elementos principais presentes na bancada experimental e suas interconexões. Por meio do diagrama é possível observar que o elemento central que possibilita a troca de informações entre os componentes da bancada e o software Simulink é a placa de aquisição de dados (SCB-68a). Essa placa possui entradas e saídas (GPIOs), digitais e analógicas, que permitem a aquisição de dados de temperatura, tensão e corrente, necessários para testes de caracterização e estimação de estados das LIBs.

Workstation é o computador que possui o software Simulink e realiza a comunicação com a placa de aquisição de dados e a Fonte Bi-direcional (IT-M3912C). Essa

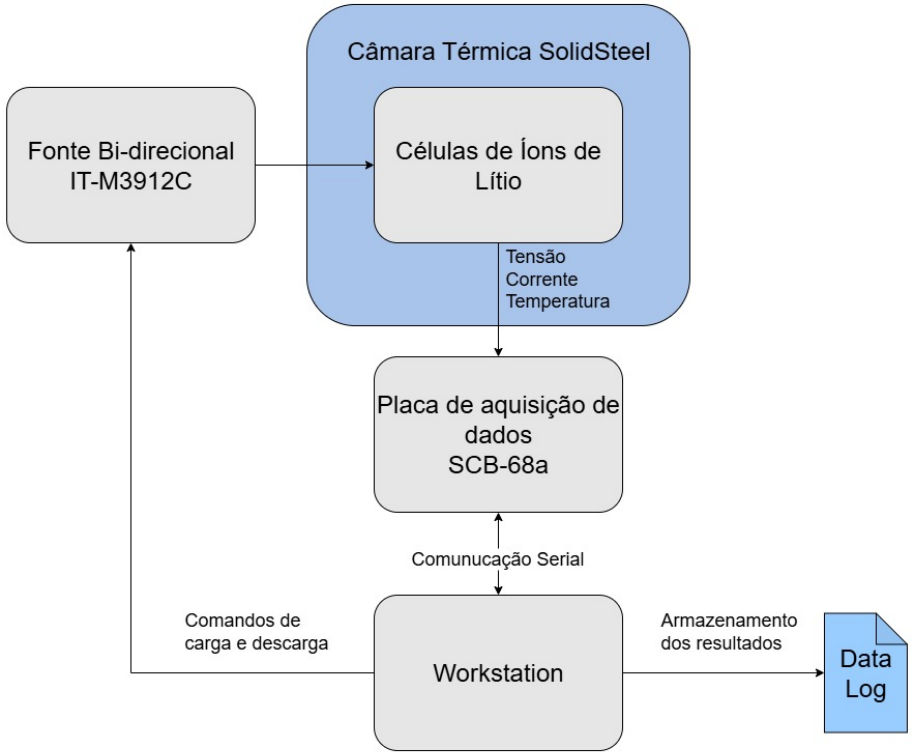


Figura 16 – Diagrama Bancada Experimental.

fonte permite a realização de ciclos de carga e descarga de células de lítio em corrente constante, esses ciclos são conhecidos como HPPC *(Hybrid Pulse Power Characterization)* e são necessários para caracterizar o desempenho dinâmico de baterias. Além disso, a Workstation permite o data log, ou seja, que todos os dados gerados durante os testes sejam armazenados. As especificações da Workstation utilizada são resumidas na tabela 9.

Tabela 9 – Especificações Worksation

Processador	AMD Ryzen Threadripper 7970X (32 Cores, 4.00 GHz)
RAM Instalada	256 GB (utilizável: 255 GB)
Armazenamento	2TB
Tipo de Sistema	Sistema operacional de 64 bits, processador baseado em x64

Por fim, a performace das LIBs é totalmente dependente das condições de temperatura em que estão submetidas, sendo necessário realizar os testes de caracterização em diferentes faixas de temperatura para caracterizar o comportamento dinâmico completo das células. Para tal, as células são inseridas no interior de uma câmara térmica do fabricante SolidSteel, garantindo que os testes sejam realizados em temperatura constante.

A Figura 17 ilustra a visão geral da bancada na qual são realizados os testes, nessa figura é possível observar os seguintes elementos: Workstation, Fonte Bi-direcional e a Câmara Térmica. Esses componentes são detalhados nas Figuras seguintes 18, 19 e 20, contudo, a placa de aquisição de dados que está atrás do monitor e não pode ser visualizada na Figura 17 é ilustrada na Figura 21.



Figura 17 – Foto de Visão Geral da Bancada Experimental.



Figura 18 – Workstation.



Figura 19 – Fonte Bi-direcional.



Figura 20 – Câmara Térmica.



Figura 21 – Placa de Aquisição de Dados.

5.3.1.2 Construção do Pack de Baterias 2S1P

A etapa de implementação experimental exige que os testes sejam realizados utilizando um pack de baterias real, idêntico ao modelado em simulação. Para isso, foram construídos dois packs de baterias na configuração 2S1P, utilizando as células cujo modelo foi apresentado na Seção 5.2.2.1. A Figura 22 ilustra um dos packs produzidos em laboratório. Cada pack de baterias possui quatro terminais, e a função de cada um deles é apresentada na Tabela 10.

Na construção dos packs de baterias, foi utilizada fita de Níquel-Cromo para a soldagem da associação em série das células. Além disso, a isolação elétrica foi realizada com o uso de papel isolante do tipo *fish paper* e a isolação térmica fita do tipo Kapton.

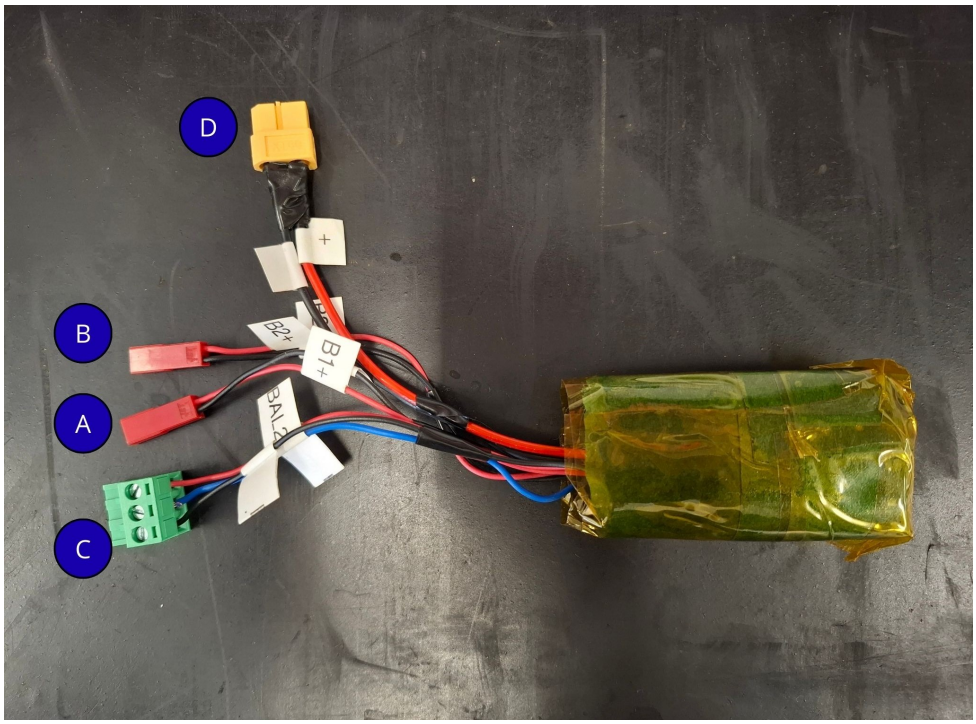


Figura 22 – Pack de Baterias 2S1P

Tabela 10 – Descrição do Terminais da Bateria 2S1P

Símbolo	Tipo de Conector	Descrição
A	JST-RCY	Leitura de tensão da célula 1
B	JST-RCY	Leitura de tensão da célula 2
C	Borne KRA/KRE	Conector de Balanceamento
D	JY70	Terminal do Pack de Baterias

5.3.1.3 Desenvolvimento do Circuito do Sistema de Equalização de Cargas

O desenvolvimento do circuito do SEC, que foi modelado previamente em simulação, é fundamental para a implementação experimental. Tal circuito deve ser capaz de realizar a comutação do resistores de balanceamento de maneira segura e confiável, a partir de comandos provenientes da lógica de controle desenvolvida em simulação.

O esquema eletrônico do circuito responsável pela equalização é apresentado na Figura 23, enquanto a Figura 24 mostra o sistema desenvolvido em laboratório em placa perfurada. Adicionalmenente, a tabela 11, apresenta uma breve descrição dos tipos e das funções dos conectores presentes na placa.

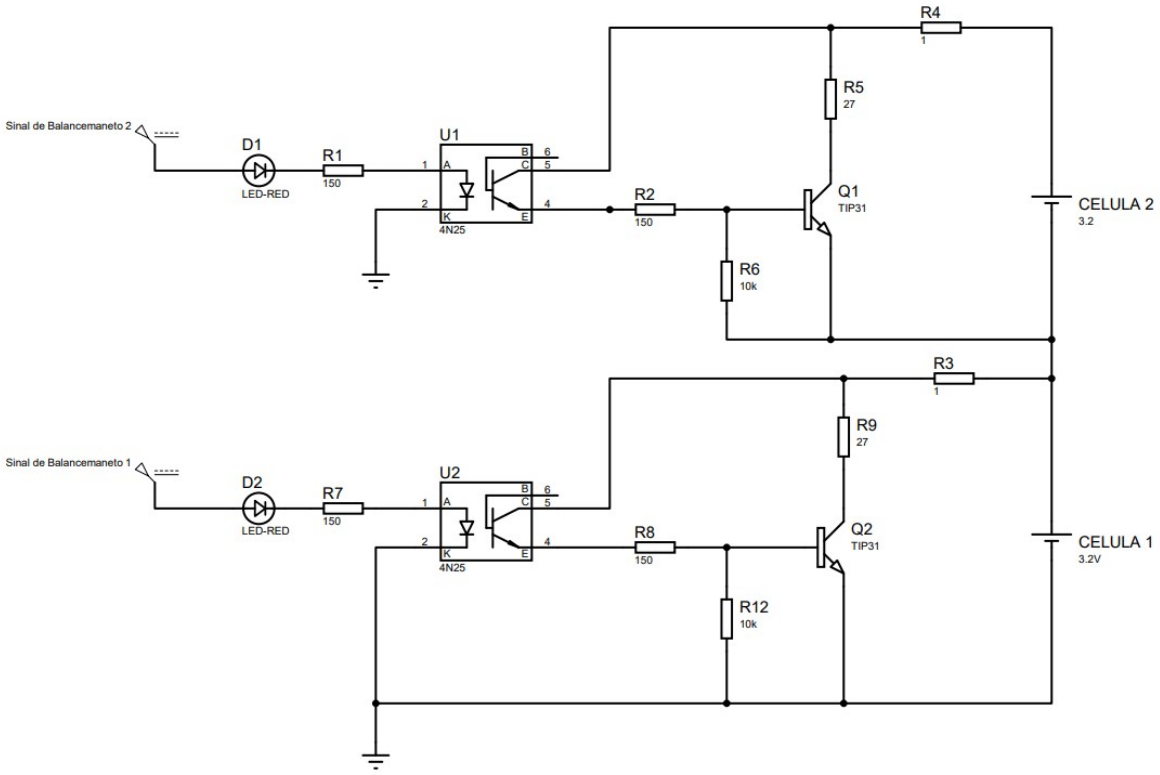


Figura 23 – Esquemático SEC

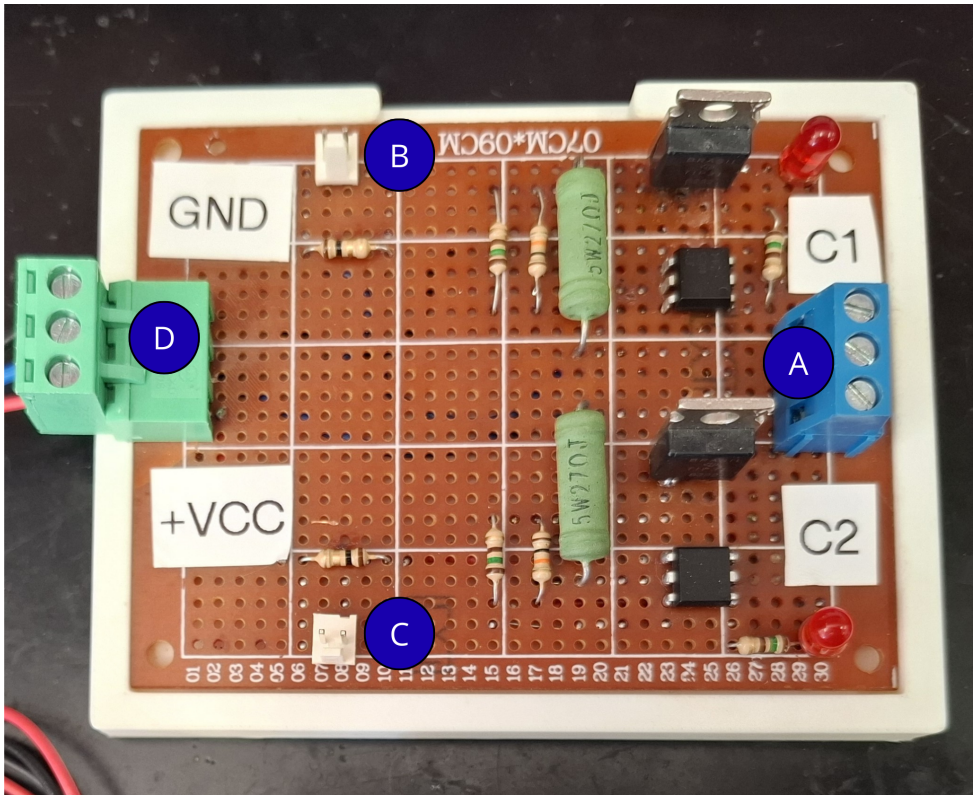


Figura 24 – Placa do SEC desenvolvida em Laboratório

Tabela 11 – Descrição dos Conectores do Circuito do SEC

Símbolo	**Tipo de Conector**	**Função**
A	Borne KRE 3T	Recebe os comandos de acionamento de cada célula
B	Molex KK 2T	Leitura de corrente de balanceamento do canal 1
C	Molex KK 2T	Leitura de corrente de balanceamento do canal 2
D	Borne KRA/KRE 3T Macho	Terminais de conexão de cada célula utilizados para o balanceamento

O circuito desenvolvido realiza a comutação dos resistores de balanceamento de 27 Ω, valor previamente dimensionado na etapa de simulação. A comutação dos resistores de balanceamento é realizada por intermédio de transistores bipolares de junção (TBJ) que operam em saturação quando estão acionados. O comando de acionamento do circuito é feito por um sinal digital de 5V. São utilizados optoacopladores para que o sinal digital seja isolado da parte de potência do balanceamento com o intuito de proteger o circuito de GPIOS da placa de aquisição de dados. Além disso, leds indicadores foram incorporados ao circuito de comutação para indicar os canais que estão realizando o balanceamento. Por fim, dois resistores shunt de 1 Ω, um para cada canal, são utilizados para medir a corrente de balanceamento individual de cada canal.

5.3.1.4 Integração dos Componentes com a Bancada

A última etapa necessária antes de realizar os procedimentos experimentais consiste em fazer a integração dos componentes desenvolvidos com a bancada experimental. Nessa etapa, o ambiente desenvolvido no *Simulink* foi migrado para o *Simulink Desktop Real Time*, substituindo o subsistema **"Pack de Baterias e Sistema de Equalização de Cargas"** pelos elementos físicos correspondentes. Essa substituição permitiu que dados reais de tensão e corrente fossem extraídos das células e integrados ao ambiente *Simulink*. Da mesma forma, os sinais de controle responsáveis pelo acionamento dos resistores de balanceamento passaram a ser enviados diretamente à placa que desempenha essa função.

A Figura 25, ilustra o diagrama de blocos da integração entre os componentes citados e suas interconexões, de maneira complementar a Figura 26, apresenta uma Foto do pack de baterias conectado a placa do SEC, inserida no interior da câmara térmica da bancada experimental, após as devidas conexões elétricas com a bancada. Por fim, a Figura 27, apresenta a tela do *Simulink Desktop Real Time* com o algoritmo de balanceamento validado previamente em simulação e pronto para os testes experimentais.

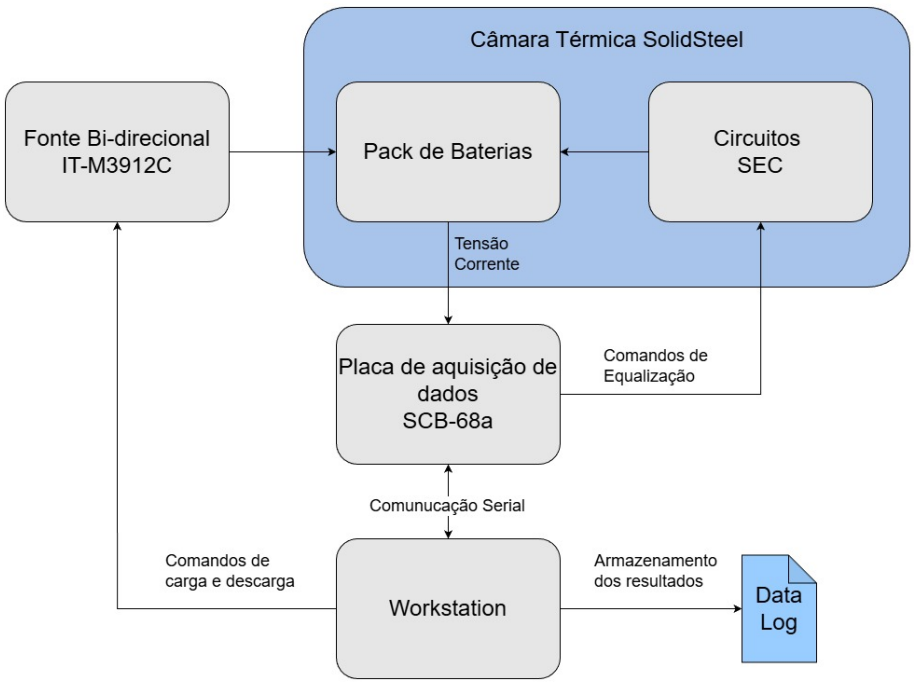


Figura 25 – Diagrama da Integração Experimental



Figura 26 – Foto da Integração do Pack de Baterias e SEC com a Bancada Experimental

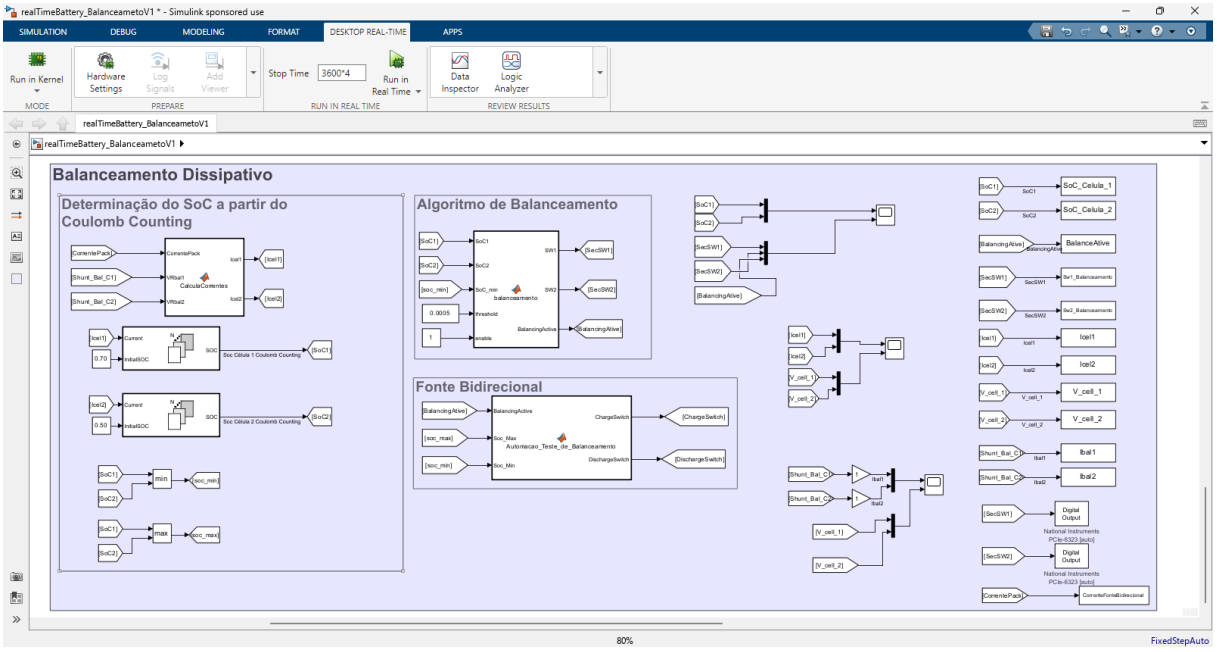


Figura 27 – Tela do *Simulink Desktop Real Time*

5.3.2 Procedimento Experimental

Os procedimentos experimentais que antecedem cada teste têm o objetivo de preparar o pack de baterias para os ensaios. Antes de cada experimento, é necessário ajustar SoC das células para atender às condições iniciais definidas para o teste. O procedimento adotado é composto por cinco etapas:

1. Desconectar o pack de baterias da bancada experimental;
2. Realizar a recarga completa de cada célula utilizando a fonte de alimentação DC MPL-3305M;
3. Executar a descarga parcial de cada célula por meio da carga eletrônica DC ET5410A+S, operando no modo bateria, que permite medir com precisão a capacidade drenada;
4. Aguardar três horas para a estabilização eletroquímica das células;
5. Reconectar o pack de baterias à bancada experimental.

5.3.3 Condições e Configurações dos Ensaios

Os testes realizados na etapa experimental são equivalentes aos executados na etapa de simulação e estão detalhados na Seção 5.2.3. O objetivo desta abordagem é comparar os resultados experimentais com os obtidos em simulação e avaliar a efetividade do circuito implementado em laboratório. A análise dos resultados é apresentada na Seção 6.

5.4 Implementação em Sistema Embarcado

Apesar da etapa anterior de implementação experimental ser capaz de demostrar a efetividade da estratégia estudada, as condições em que foram realizados os testes ainda se distanciam de um cenário de aplicação prática. Essa limitação decorre do fato de a implementação da lógica de controle estar inserida em um ambiente *Simulink Desktop Real Time*, o qual depende de um computador para execução dos algoritmos. Além disso, a placa de aquisição de dados (SCB-68A), responsável pela leitura das tensões e correntes das células, é destinada exclusivamente ao uso em laboratório.

A etapa atual tem como objetivo implementar a estratégia de balanceamento em um sistema embarcado, de modo a aproximar o desenvolvimento de uma aplicação real em sistemas de armazenamento de energia, como aqueles presentes em veículos elétricos. Essa implementação requer que a lógica de balanceamento desenvolvida no *Simulink* seja adaptada e incorporada a um microcontrolador. Ademais, o sistema embarcado deve ser capaz de realizar a aquisição dos dados das baterias necessários para o funcionamento do

algoritmo, eliminando a dependência tanto de um computador externo quanto da placa de aquisição utilizada na etapa experimental.

5.4.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

Essa seção apresenta os materiais e equipamentos utilizados durante o desenvolvimento da implementação em sistema embarcado. De maneira auxiliar, a tabela 12 resume os principais itens utilizados.

Tabela 12 – Lista Geral de Materiais e Equipamentos Utilizados na Implementação Embarcada

Materiais e componentes	**Marca**	**Modelo**
Computador	Dell	G15
Circuito de Monitoramento e Equalização de Cargas	Texas Instruments	BQ79616EVM
Microcontrolador	Texas Instruments	Hercules TMS570LS12x
Softwre Code Composer Studio	Texas Instruments	Versão V12.8.1
Pack de Baterias 6S1P	BAK	NMC-21700

5.4.1.1 Circuito Monitoramento Equalização de Cargas BQ79616EVM

O principal desafio para implementar a estratégia estudada em um sistema embarcado consiste na medição das grandezas elétricas de tensão e corrente das células. Na etapa experimental anterior, essa função era desempenhada pela placa de aquisição de dados SCB-68A. Contudo, em uma aplicação prática, torna-se necessária a implementação de circuitos de instrumentação adequados para a medição das tensões diferenciais presentes nos packs de baterias reais.

Embora seja possível desenvolver circuitos de instrumentação capazes de monitorar tensões diferenciais em cada célula do pack, esses sistemas envolvem múltiplos estágios, incluindo circuitos subtratores, amplificadores de instrumentação, filtros analógicos para redução de ruído e conversores analógico-digitais dedicados para cada canal. Além disso, tais circuitos devem operar com elevada precisão, confiabilidade e suportar elevadas tensões. A análise desses requisitos conduziu à adoção de um circuito integrado comercial especializado para aplicações de BMS.

Atualmente, o mercado dispõe de diversas soluções de monitoramento de baterias, comumente classificadas como AFEs (Analog Front End). Esses circuitos realizam a interface direta com as células, fornecendo ao BMS dados de tensão, corrente e temperatura. Entre os principais fabricantes, destacam-se: Infineon (TLE9012DQU), Analog Devices (série ADBMS), Texas Instruments (famílias BQ e AFE), STMicroelectronics (L9963E),

Eberspaecher Vecture (V04246), NXP (MC33771C) e Renesas (séries ISL e RAA), entre outros.

O circuito de monitoramento utilizado nesta etapa de desenvolvimento é o BQ79616-Q1 da Texas Instruments, cuja as informações detalhadas podem ser obtidas no *datasheet* (Texas Instruments, 2023a). O chip está integrado a placa BQ79616EVM que é destinada ao desenvolvimento preliminar de sistemas que visam utilizá-lo em aplicações comerciais. A Figura 28 apresenta o módulo empregado, cuja documentação técnica pode ser consultada em (Texas Instruments, 2023b).

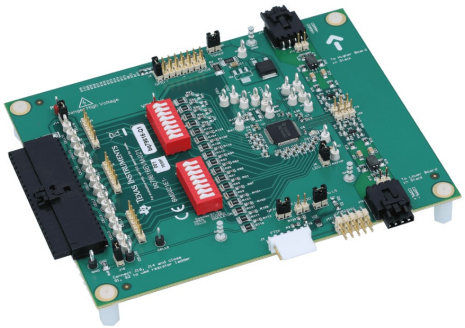


Figura 28 – Circuito de Monitoramento e Equalização de Cargas BQ79616EVM

A placa de desenvolvimento foi disponibilizada pela equipe FGR (Fórmula Racing Gama), da Universidade de Brasília, que participa anualmente da competição Formula SAE Brasil (SAE Brasil, 2025), na categoria de veículos elétricos. A equipe utiliza esse módulo no desenvolvimento do subsistema de monitoramento do pack de baterias do protótipo elétrico.

O circuito integrado BQ79616-Q1 atende aos requisitos de segurança funcional da norma ISO 26262, aplicáveis à indústria automotiva, e é capaz de monitorar packs de baterias contendo entre 6 e 16 células associadas em série. Adicionalmente, a placa de desenvolvimento incorpora um circuito de balanceamento dissipativo com capacidade de corrente de até 240 mA, o que permite substituir tanto o circuito de equalização desenvolvido anteriormente quanto a placa de aquisição de dados utilizada na etapa experimental. O diagrama de blocos funcionais do chip BQ79616-Q1, fornecido pelo fabricante e apresentado na Figura 29, possibilita a visualização dos blocos responsáveis pela leitura das tensões das células, bem como do bloco destinado ao circuito de balanceamento.

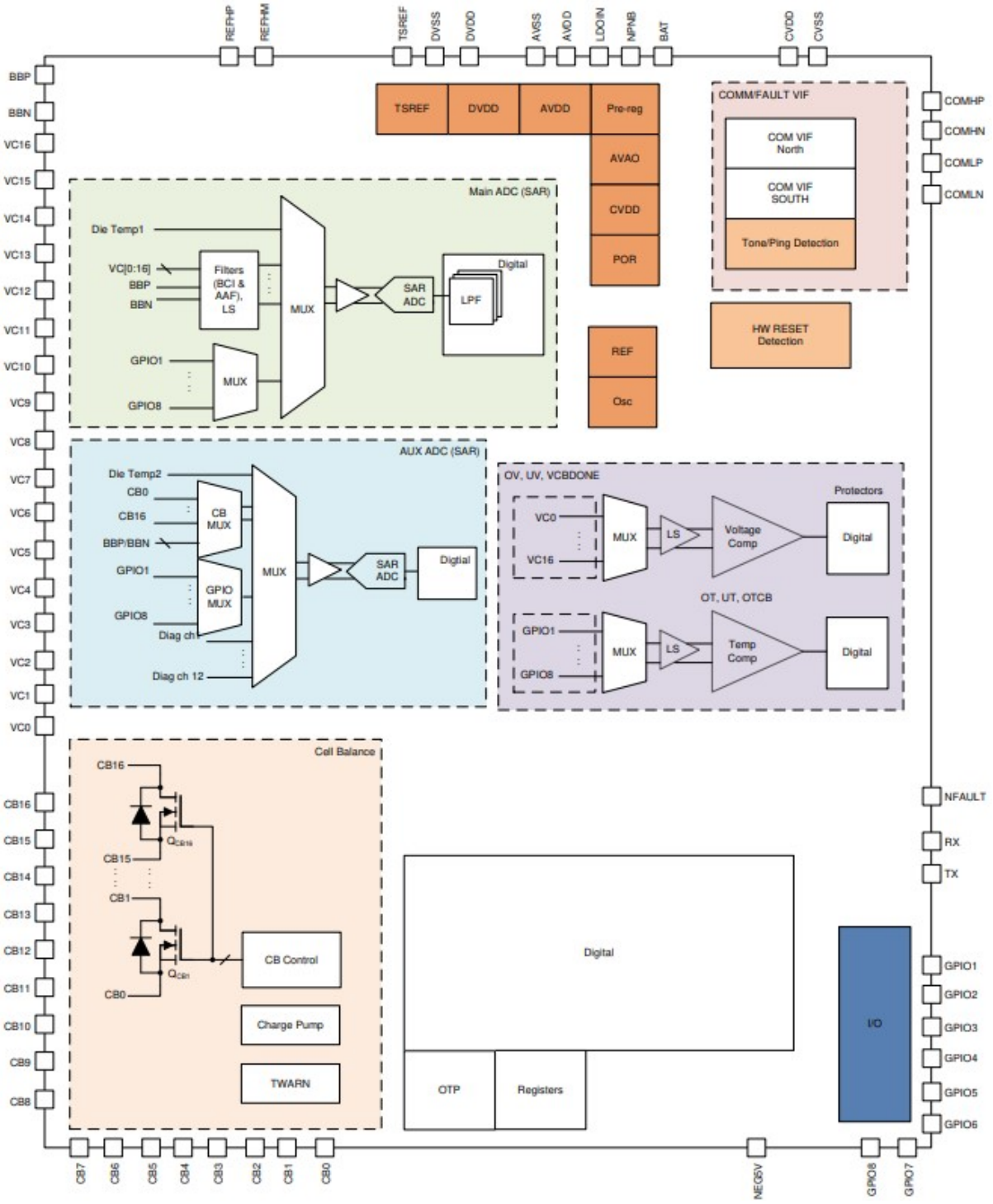


Figura 29 – Diagrama de Blocos Funcionais Chip BQ79616-Q1

5.4.1.2 Microcontrolador Hercules TMS570LS12x

A seleção do microcontrolador Hercules TMS570LS12x foi realizada com base nas recomendações do fabricante da placa BQ79616EVM, conforme apresentado no *Datasheet* (Texas Instruments, 2023b). O dispositivo utilizado, ilustrado na Figura 30, possui certificações voltadas para aplicações automotivas, o que o torna adequado para sistemas

sujeitos a requisitos de segurança e confiabilidade elevados. Entre suas principais áreas de aplicação destacam-se sistemas de gerenciamento de baterias (BMS), inversores para veículos elétricos e híbridos, e sistemas de frenagem ABS, entre outros (Texas Instruments, 2024).

A adoção desse microcontrolador viabiliza a implementação embarcada da lógica de controle de balanceamento, eliminando a necessidade do ambiente *Simulink Desktop Real-Time* e de um computador dedicado para a execução do algoritmo.

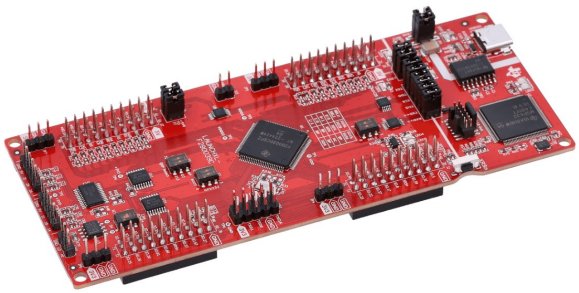


Figura 30 – Microcontrolador TMS570LS12x

5.4.1.3 Construção do Pack de Baterias 6SP1

O desenvolvimento do pack de baterias também levou em consideração as especificações da placa de monitoramento e equalização de cargas, que exige a utilização de no mínimo 6 células associadas em série. As células de utilizadas na implementação experimental, de $LiFePO_4$-18650, foram substituídas por células NMC-21700 (Níquel Manganês e Cobalto). A modificação visa que ao longo dos testes seja possível observar não apenas o valor de SoC para avaliar a efetividade do balanceamento, mas também o valor tensão individual de cada célula, pois as células de NMC possuem maior variação de tensão em relação ao SoC comparadas as células de $LiFePO_4$ utilizadas anteriormente.

Foram construídos dois packs de baterias 6S1P, cujo processo de montagem pode ser observado pela Figura 31. Cada pack possui dois conectores, como pode ser observado pela Figura 32. Um dos terminais está conectado aos polos positivo e negativo do pack de baterias e é destinado a recarga dos pack e o outro está conectado aos polos de cada célula do pack de baterias e é destinado a conexão com a placa de monitoramento e equalização de cargas.

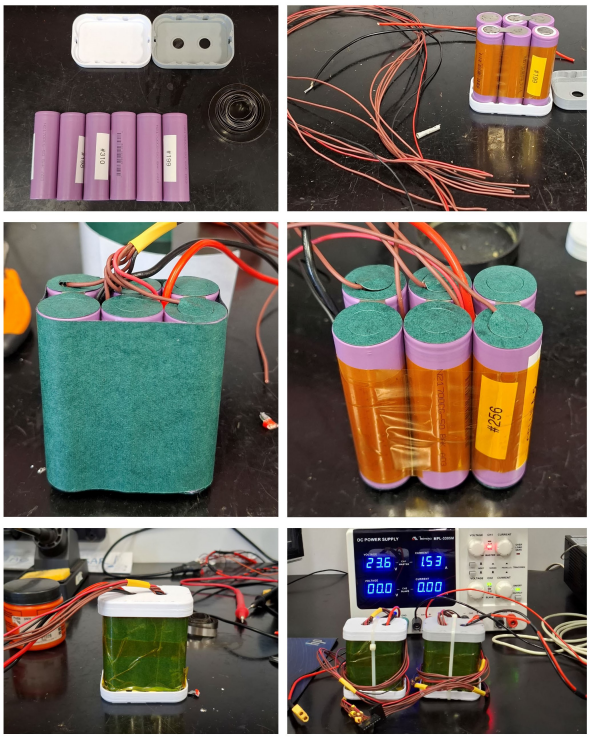


Figura 31 – Construção Pack de Baterias 6S1P NMC-21700



Figura 32 – Pack de Baterias 6S1P NMC-21700

5.4.1.4 Integração dos Componentes do Sistema Embarcado

A conexão entre os elementos descritos ao longo das seções anteriores compõem o aparato experimental necessário para a realização do testes da implementação embarcada. O diagrama de blocos da Figura 33, apresenta a disposição dos elementos e os protocolos de comunicação utilizados para troca de dados entre eles. Adicionalmente, a Figura 34

apresenta a foto na qual os elementos estão dispostos em bancada para a realização dos testes.

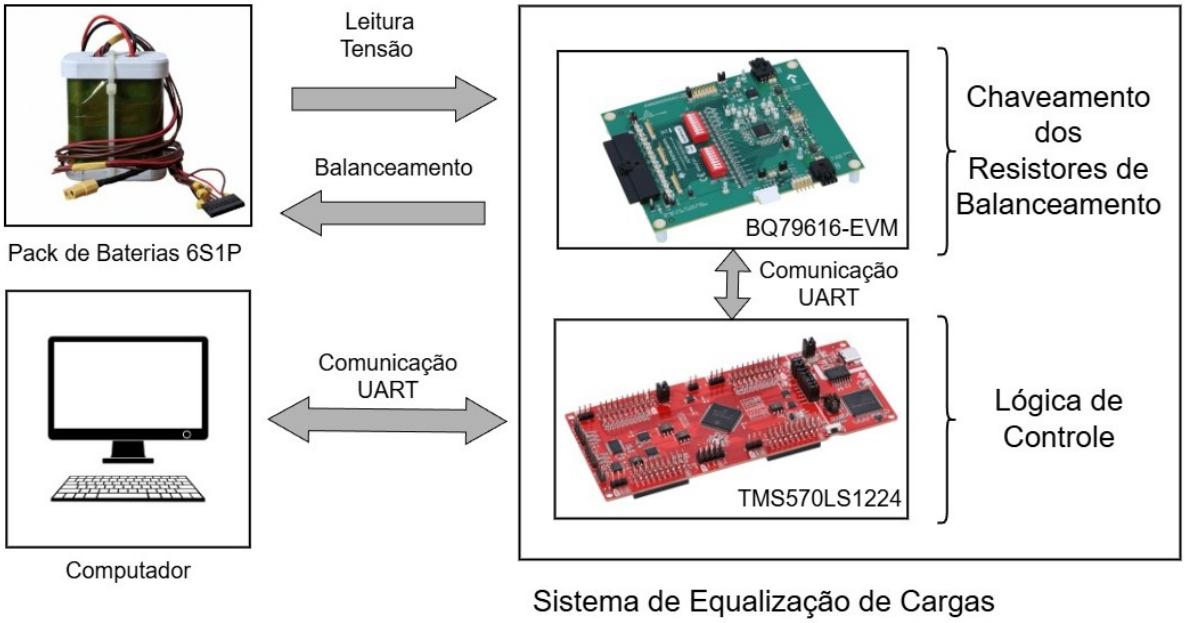


Figura 33 – Diagrama de Blocos Sistema Embarcado

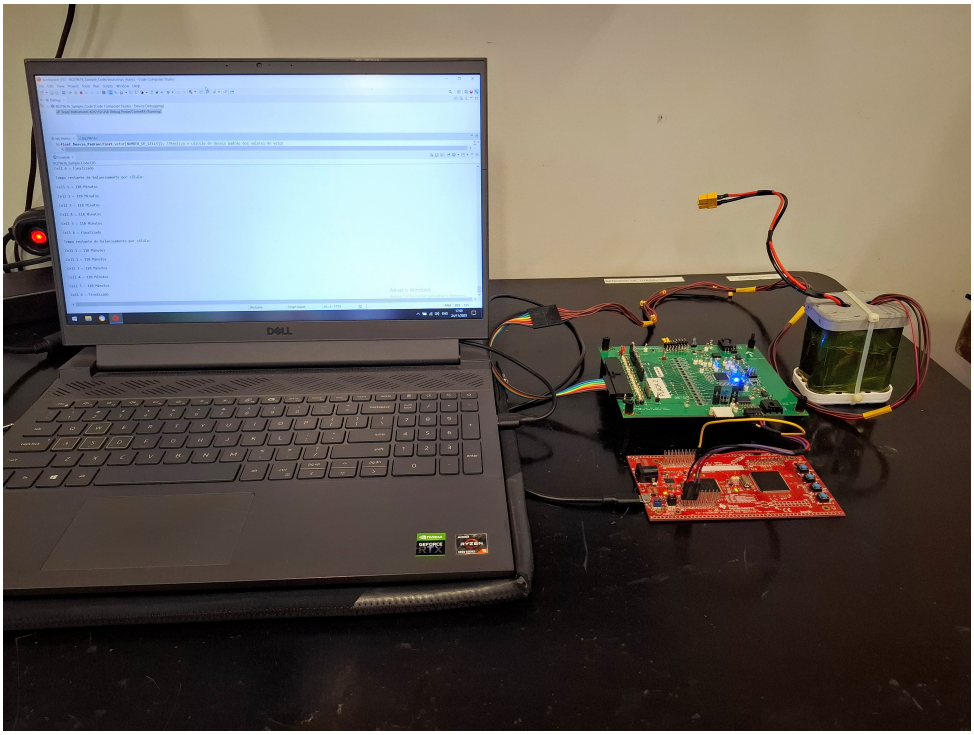


Figura 34 – Foto SEC Embarcado

5.4.1.5 Desafios para a Implementação da Lógica de Controle Embarcada

Apesar de o circuito de equalização presente na placa BQ79616EVM também operar de forma dissipativa por meio de resistores de derivação comutados, as condições de operação desse módulo e do CI BQ79616 impõem adaptações à lógica de controle previamente desenvolvida e validada nas etapas de simulação e implementação experimental.

A principal diferença da implementação embarcada utilizando a placa BQ79616EVM, em relação à implementação experimental realizada na etapa anterior, decorre do fato de que essa placa não possui sensores embarcados de medição de corrente. Tal limitação inviabiliza a determinação do SoC individual das células por meio do método de contagem de coulomb.

A solução adotada consiste em estimar o SoC de cada célula a partir da tensão de circuito aberto (OCV), determinando o SoC inicial do pack antes do início do processo de balanceamento. Embora esse método seja simples, ele exige que o pack permaneça em repouso por um período mínimo de três horas, garantindo a ausência de corrente e a estabilização eletroquímica necessária para a leitura correta da OCV. Consequentemente, essa abordagem restringe a operação do SEC apenas a momentos em que o pack de baterias não está sendo carregado nem descarregado.

A inexistência de medições de corrente também impede o monitoramento direto da corrente de balanceamento aplicada a cada célula, impossibilitando o cálculo em tempo real da energia dissipada. No entanto, a partir das leituras de tensão das células e do valor conhecido da resistência de balanceamento, é possível estimar a corrente aplicada em cada canal e, assim, determinar o tempo de balanceamento necessário para cada célula durante o processo de equalização.

5.4.1.6 Determinação do SoC a partir da Tensão de OCV

A estimação do SoC a partir da tensão de circuito aberto (OCV) é realizada por meio de uma função polinomial de segunda ordem, dada por

$$SoC(V) = 0{,}43011913\,V^2 - 2{,}19427233\,V + 2{,}69685974.$$

Os coeficientes do modelo foram obtidos por ajuste matemático utilizando o método dos mínimos quadrados. Os dados empregados no cálculo do ajuste foram extraídos dos ensaios experimentais de caracterização das células NMC 21700, conduzidos em laboratório e descritos em (SOLíS, 2025).

A qualidade do ajuste pode ser observada na Figura 35, que apresenta tanto os pontos experimentais quanto a curva polinomial ajustada. O erro quadrático médio (RMSE), indicado na mesma figura, apresenta valor aproximado de 0,01 para o SoC estimado, evidenciando a adequação do modelo para uso na estratégia proposta.

O ajuste foi realizado considerando apenas a condição de operação em temperatura ambiente de 25 °C. Ainda assim, a função obtida é considerada adequada para a estimação do SoC e sua implementação no microcontrolador permite que a lógica de equalização opere com base no SoC das células do pack de baterias.

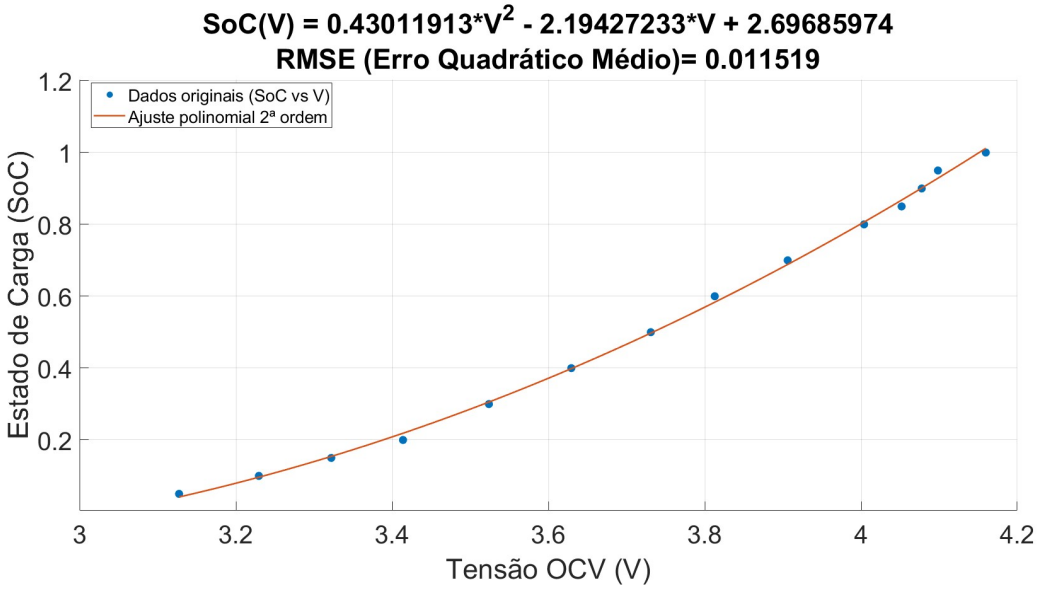


Figura 35 – Estimação do SoC Utilizando a Tensão de OCV

5.4.1.7 Estimação do Tempo de Balanceamento

Embora a placa de monitoramento e equalização de cargas não realize medições individuais das correntes de cada célula, ainda é possível estimar a corrente de balanceamento e determinar o tempo necessário para a equalização. A lógica de controle implementada nesta etapa do desenvolvimento embarcado difere da abordagem utilizada nas fases de simulação e experimentação, nas quais o estado de carga (SoC) era acompanhado em tempo real por meio da contagem de coulomb.

A estratégia de controle adotada no sistema embarcado consiste em estimar o tempo de equalização necessário para corrigir a diferença de SoC entre as células do pack, eliminando a necessidade de medições de corrente para estimativa do SoC. Quando o sistema de balanceamento é acionado, os valores de SoC são estimados a partir das tensões individuais de cada célula, conforme descrito na seção anterior. A partir desses valores, o algoritmo determina o tempo de equalização calculando a capacidade residual de carga que deve ser drenada de cada célula e estimando a corrente média de balanceamento. O cálculo do tempo de equalização é apresentado na Equação 5.5.

$$T_{Bal}(\text{minutos}) = \frac{C_R}{I_{\text{Bal(méd)}}} \cdot \frac{60 \text{ minutos}}{1 \text{ horas}} \tag{5.5}$$

onde:

- T_{Bal} = tempo de balanceamento (minutos);
- C_R = capacidade residual de carga (mAh);
- $I_{\text{Bal(méd)}}$ = corrente média de balanceamento (mA).

A capacidade residual de carga é calculada conforme a Equação 5.6:

$$C_R = (SoC_{\text{Cell n}} - SoC_{\text{mín}}) \cdot C_n \tag{5.6}$$

onde:

- $SoC_{\text{Cell n}}$ = SoC da célula n (%);
- $SoC_{\text{mín}}$ = menor SoC entre todas as células (%);
- C_n = capacidade nominal das células (mAh).

Por fim, a corrente média de balanceamento é estimada pela Equação 5.7:

$$I_{\text{Bal(méd)}} = \frac{V_{\text{Cell n}} - V_{\text{mín}}}{2\,R_{Bal}} \tag{5.7}$$

onde:

- $V_{\text{Cell n}}$ = tensão da célula n (V);
- $V_{\text{mín}}$ = menor tensão do conjunto de células (V);
- R_{Bal} = resistência de balanceamento (Ω).

A resistência de balanceamento empregada na placa BQ79616EVM foi obtida a partir de medições realizadas com o auxílio de um multímetro e das informações fornecidas no *datasheet* do chip. O circuito de comutação empregado para o balanceamento é ilustrado no esquemático eletrônico apresentado na Figura 36.

No diagrama é possível observar que a resistência de balanceamento R_{Bal} resulta da associação em série de três elementos: dois resistores externos ao chip, de resistência R_{CB}, e a resistência interna do MOSFET de comutação, $R_{dson_{QCB}}$. Os resistores R_{CB} foram identificados na placa e apresentaram resistência de 10 Ω. Já a resistência interna do MOSFET foi estimada a partir da média dos valores mínimo e máximo fornecidos no *datasheet*:

$$R_{dson_{QCB}} = \frac{1{,}45 + 4{,}6}{2} = 3{,}025\ \Omega.$$

Dessa forma, a resistência total de balanceamento é dada por:

$$R_{Bal} = 2 \cdot R_{CB} + R_{dson_{QCB}} = 2 \cdot 10 + 3{,}025 = 23{,}025\ \Omega.$$

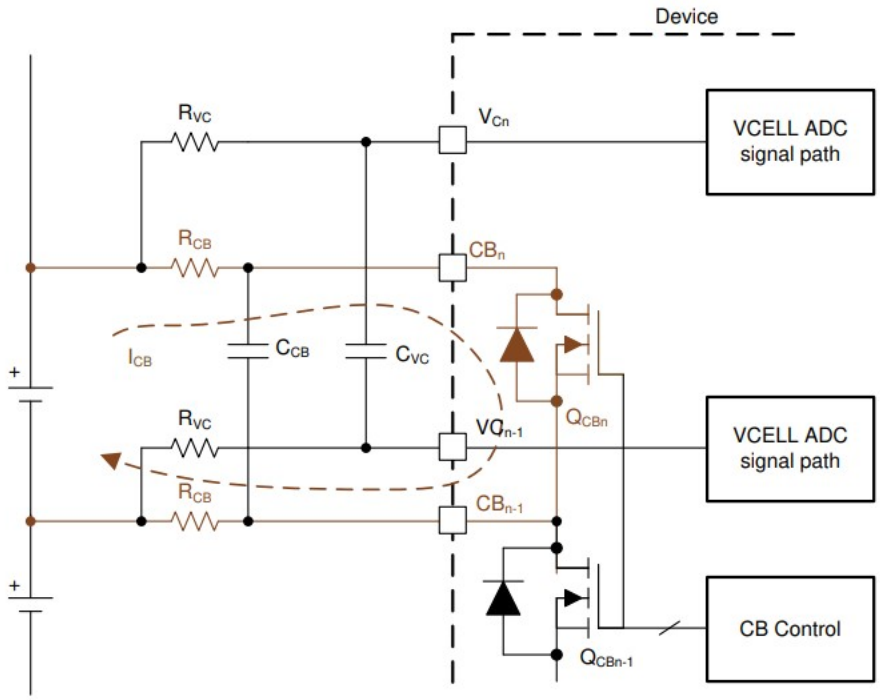


Figura 36 – Circuito de Equalização de Cargas BQ79616EVM

Por fim, antes de realizar o balanceamento com base no tempo estimado pela equação 5.5 é necessário saber que o Chip BQ79616 possui registradores destinados a fazer o controle do tempo de equalização. Tais registradores permitem a configuração do tempo de balanceamento de cada canal e realizam o controle de tempo de forma precisa, eliminando a necessidade de intervenção do microcontrolador ao longo do processo de equalização. Contudo, os registradores de balanceamento seguem uma tabela de valores de tempo discretos, pré-determinados, e os valores de tempo de balanceamento estimados pela equação 5.5 devem ser aproximados conforme especificado na tabela 13 presente no *Datasheet* do Chip. A configuração dos registradores com o tempo de balanceamento padronizados pela Tabela 13 é a última etapa necessária para a implementação da nova lógica e controle embarcada. Após obter o valores de tempo de balanceamento de cada célula pela Equação 5.5, os valores calculados o são aproximados para o valor mais próximo e inferior disponível na tabela, estratégia que visa evitar a descarga de energia excessiva durante o processo de equalização equalização e que pode gerar desbalanceamento das células do pack de baterias.

Tabela 13 – Tabela do Configuração do Tempo de Balanceamento de Cada Célula

Valor (hex)	**Tempo de Balanceamento**
0x00	0 s (desativa o balanceamento)
0x01	10 s
0x02	30 s
0x03	60 s
0x04	300 s
0x05 – 0x10	10 min a 120 min (incrementos de 10 min)
0x11 – 0x1F	150 min a 540 min (incrementos de 30 min) e 600 min

5.4.1.8 Lógica de Balanceamento adaptada e implementada em sistema Embarcado

As considerações feitas a cerca das condições de operação da placa de desenvolvimento em conjunto com a implementação das equações que realizam a estimação do SoC e do tempo de balanceamento no microcontrolador possibilitaram o desenvolvimento da lógica de controle geral, apresentada no Diagrama pela Figura 37. A etapa de "Determinar o Tempo de Balanceamento de Cada Célula", contida no "Diagrama da Lógica Geral do SEC" 37 e discutida na Seção 5.4.1.7, é detalhada por meio do "Diagrama da Lógica do Tempo de Balanceamento do SEC", ilustrado na Figura 38.

A lógica de controle do SEC, utilizando a placa de desenvolvimento BQ79616EVM, e apresentada nos Diagramas 37 e 37, foram desenvolvidas, implementadas e debugadas em linguagem de programação C, no microcontrolador TMS570LS12x, com o auxílio de um computador com o software *Code Composer Studio* (CSS) Versão 12.8.1, previamente instalado e disponibilizado de forma gratuita pela Texas Instruments.

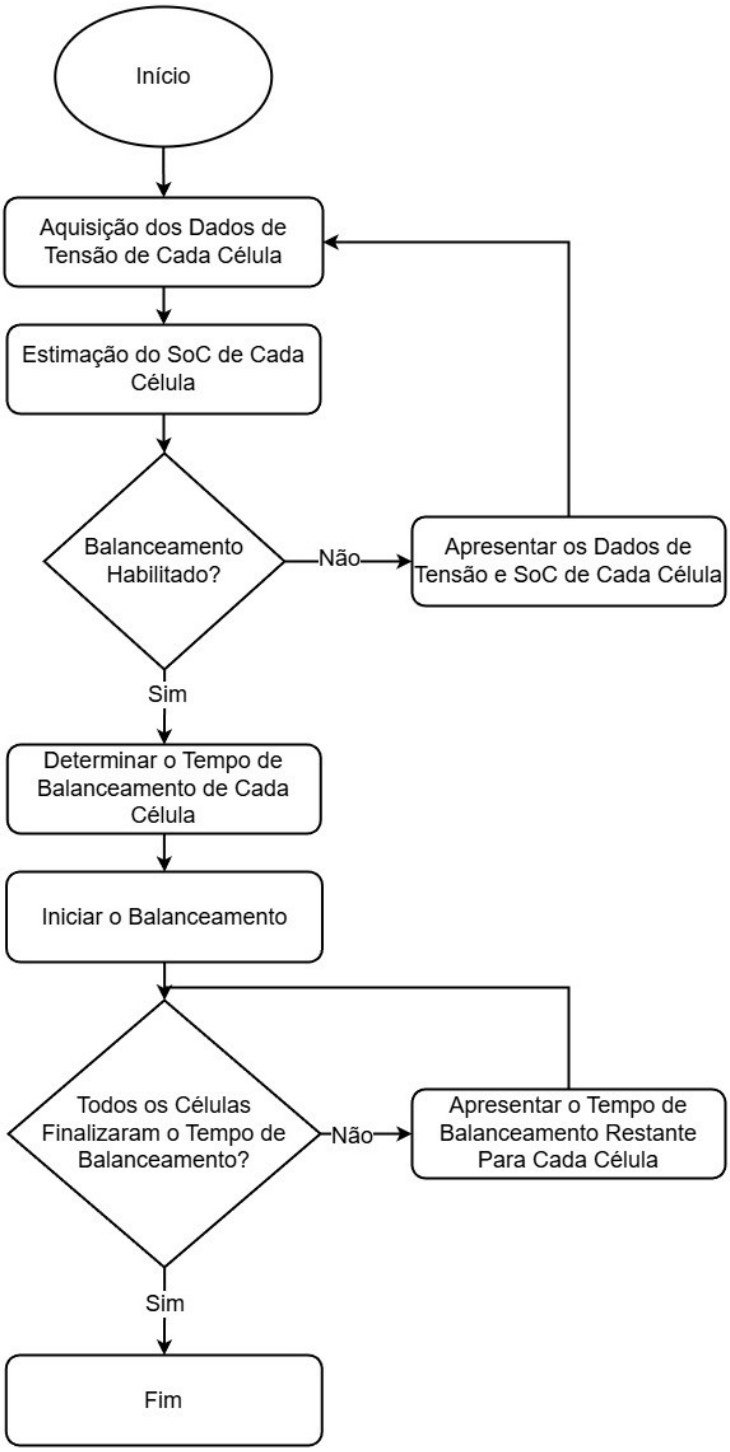


Figura 37 – Diagrama da Lógica Geral do SEC

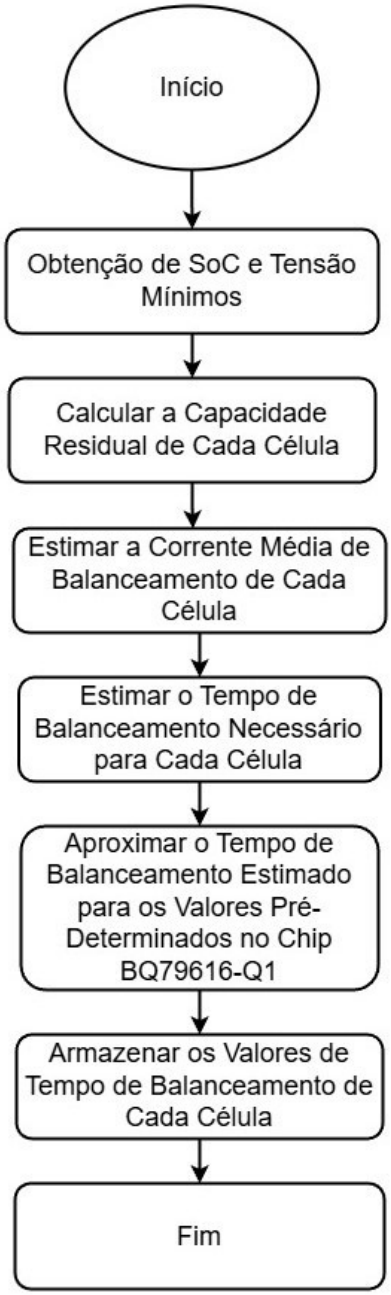


Figura 38 – Diagrama da Lógica do Tempo de Balanceamento do SEC

5.4.2 Procedimento Experimental

Os procedimentos experimentais que antecedem cada teste são conduzidos conforme descrito na Seção 5.3.2, de forma a preparar o pack de baterias para os ensaios. Antes de cada experimento, o pack é propositalmente desbalanceado com o auxílio de uma carga eletrônica de bancada, de modo a gerar dispersão nos valores de SoC entre as células. Os procedimentos realizados são listados a seguir:

1. Realizar a recarga completa de cada célula utilizando a fonte de alimentação DC MPL-3305M;
2. Executar a descarga parcial e aleatória de cada célula por meio da carga eletrônica DC ET5410A+S, operando no modo bateria, que permite medir com precisão a capacidade drenada;
3. Aguardar três horas para a estabilização eletroquímica das células;
4. Conectar o pack de baterias ao SEC.

A dispersão nos valores de SoC garante que, ao ser habilitado, o SEC possa identificar a desequalização entre as células e aplicar a lógica de balanceamento desenvolvida, possibilitando a avaliação da efetividade da estratégia implementada.

5.4.3 Condições e Configurações dos Ensaios

A partir dos procedimentos experimentais previamente descritos na Seção 5.4.2, foram selecionados três testes, dentre os diversos ensaios realizados, com o objetivo de ilustrar a efetividade do SEC embarcado. Os testes escolhidos abrangem diferentes níveis iniciais de dispersão de SoC entre as células: alto, médio e baixo.

Antes e depois de cada ensaio, foram medidos os valores de tensão e SoC de cada célula do pack de baterias 6S1P. Para cada uma das medições, os valores fornecidos pelo SEC foram comparados com medições de referência obtidas por meio de um multímetro digital, a fim de avaliar a precisão de leitura do CI BQ79616.

Além dos valores individuais de tensão e SoC, são calculadas também métricas que quantificam a dispersão de SoC no pack. Devido ao número maior de células presente nesta implementação embarcada (seis células), em comparação com a implementação experimental anterior (duas células), utilizam-se não apenas os valores de diferença máxima de SoC, mas também o desvio padrão entre as células para melhor caracterização da dispersão.

As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam, respectivamente, os dados iniciais dos três testes com níveis decrescentes de desequalização. Ao final de cada procedimento, espera-se que as métricas de dispersão, destacadas em vermelho, apresentem redução significativa, comprovando a efetividade do sistema de balanceamento desenvolvido.

Tabela 14 – Condições Iniciais e Métricas de Dispersão - Teste 1 (Dispersão de SoC Alta)

Condições Iniciais de Tensão			
Célula	Referência (V)	BQ79616 (V)	Erro Absoluto (mV)
1	3,556	3,578	12,285
2	3,626	3,627	1,303
3	3,629	3,627	1,697
4	3,594	3,578	15,715
5	3,709	3,725	16,338
6	3,784	3,774	9,644

Condições Iniciais de SoC			
Célula	Referência (%)	SEC (%)	Erro Absoluto (%)
1	34,163	35,242	1,079
2	39,558	39,678	0,079
3	39,835	39,678	0,157
4	36,642	35,242	1,400
5	47,531	49,170	1,639
6	55,246	54,227	1,019

Métricas de Dispersão dos valores de SoC do Pack de Baterias		
Métrica	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Referência	21,082	7,15
SEC	18,984	7,10

Tabela 15 – Condições Iniciais e Métricas de Dispersão - Teste 2 (Dispersão de SoC Moderada)

Condições Iniciais de Tensão			
Célula	Referência (V)	BQ79616 (V)	Erro Absoluto (mV)
1	3,854	3,823	30,626
2	3,911	3,921	10,409
3	3,818	3,823	5,374
4	3,841	3,823	17,626
5	3,832	3,823	8,626
6	3,887	3,872	14,609

Condições Iniciais de SoC			
Célula	Referência (%)	SEC (%)	Erro Absoluto (%)
1	62,883	59,490	3,393
2	69,413	70,636	1,223
3	58,903	59,490	0,587
4	61,433	59,490	1,943
5	60,437	59,490	0,948
6	66,629	64,959	1,670

Métricas de Dispersão dos valores de SoC do Pack de Baterias		
Métrica	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Referência	10,510	3,64
SEC	11,146	4,24

Tabela 16 – Condições Iniciais e Métricas de Dispersão - Teste 3 (Dispersão de SoC Baixa)

Condições Iniciais de Tensão			
Célula	Referência (V)	BQ79616 (V)	Erro Absoluto (mV)
1	3,492	3,480	11,750
2	3,503	3,480	22,750
3	3,507	3,480	26,750
4	3,511	3,480	30,750
5	3,510	3,480	29,750
6	3,529	3,529	0,268

Condições Iniciais de SoC			
Célula	Referência (%)	SEC (%)	Erro Absoluto (%)
1	27,936	26,991	0,945
2	28,832	26,991	1,841
3	29,160	26,991	2,170
4	29,490	26,991	2,499
5	29,407	26,991	2,417
6	30,991	31,013	0,023

Métricas de Dispersão dos valores de SoC do Pack de Baterias		
Métrica	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Referência	3,054	0,91
SEC	4,023	1,49

6 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos para as três implementações, simulação, experimental e embarcada, cuja metodologia foi apresentada ao longo do capítulo 5.

6.1 Apresentação dos Resultados de Simulação

6.1.1 Resultados da Simulação sem Balanceamento

A Figura 39 exibe os resultados do cenário sem balanceamento, teste 1. Observa-se que, devido à diferença inicial de 20% entre os SoCs das células, o sistema opera de forma ineficiente. Durante a carga, a célula com maior SoC atinge o limite superior antes da outra, interrompendo o processo de carregamento. Como consequência, a célula com menor SoC não atinge sua capacidade total, limitando o aproveitamento energético do pack. De forma semelhante, no processo de descarga, a célula menos carregada atinge primeiro o limite inferior, forçando o fim da descarga antes que a outra célula esgote sua energia.

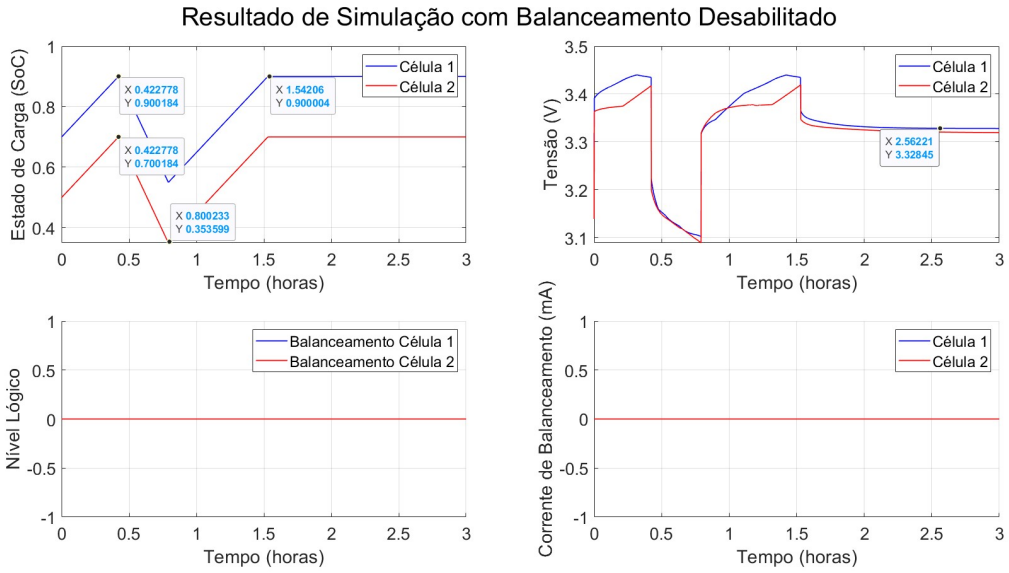


Figura 39 – Simulação Balanceamento Desabilitado

6.1.2 Resultados da Simulação com Balanceamento

A Figura 40 apresenta os resultados obtidos com o balanceamento ativo, teste 2. Logo no início da simulação, a diferença de SoC entre as células é detectada, acionando o bloco de controle responsável pela equalização. Ambas as células iniciam a fase de carregamento, porém o resistor de equalização da célula 1 é habilitado, e parte da corrente de recarga destinada a célula 1 é desviada para seu respectivo resistor, reduzindo a corrente de carga para a célula 1, fato que pode ser observado pela leve inclinação na curva de SoC da célula 1 em relação a célula 2. A redução da corrente de carga da célula 1, durante o processo de carregamento, permite que a célula 2 possa armazenar mais energia antes que o carregamento tenha que ser interrompido devido ao carregamento completo da célula 1.

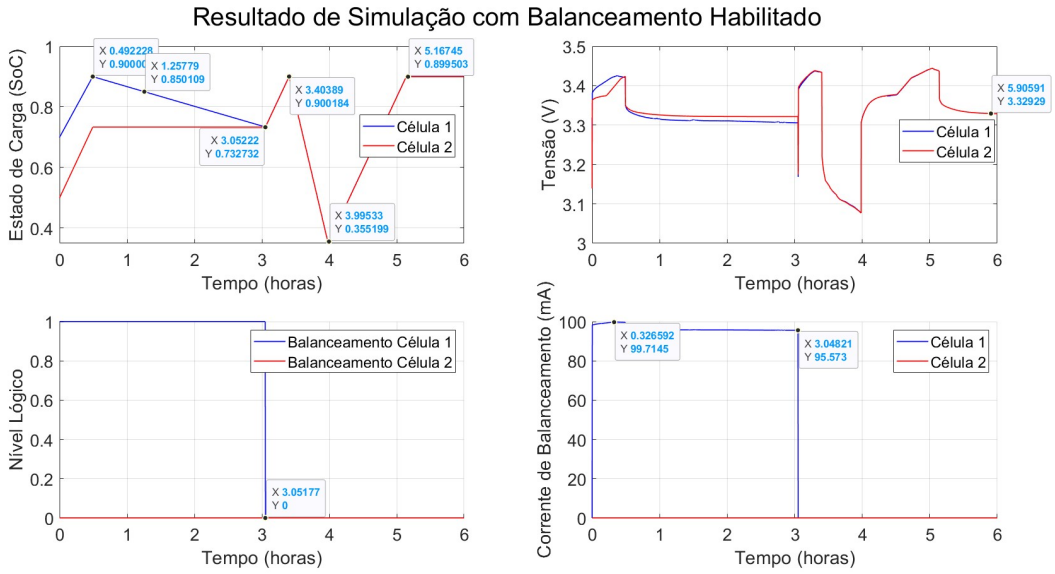


Figura 40 – Simulação Balanceamento Habilitado

No momento em que o carregamento precisa ser interrompido para não danificar a célula 1 por sobrecarga, a corrente da fonte Bi-direcional é cortada e ambas a células tem o carregamento interrompido, no entanto resistor de equalização da célula 1 permanece ativo, realizando o processo de equalização enquanto a célula 2 permanece com o SoC constante. Essa estratégia permite reduzir gradualmente o SoC da célula 1 até igualá-lo ao da célula 2, promovendo o balanceamento. Após a equalização, ambas as células passam a ser carregadas simultaneamente até 90% de SoC.

Todo o processo de equalização é conduzido de forma gradual e controlada, respeitando o *threshold* de 0,05% adotado no algoritmo. O sinal de controle que indica a atuação do sistema de balanceamento pode ser observada na parte inferior da Figura 40, que indica os instantes de acionamento da chave associada ao resistor de dissipação. Com o término do balanceamento, o sistema passa a operar em ciclos de carga e descarga com

as duas células em condições similares de SoC, ilustrando o funcionamento adequado do pack de baterias em um cenário comum de uso.

6.2 Discussão e Análise dos Resultados de Simulação

O resultado obtido para o teste em que o balanceamento está desabilitado evidencia a redução da a autonomia do sistema, pois parte da energia armazenada permanece inutilizada, como carga residual, que limita os processos de carga e descarga das células. Considerando que a célula limitante inicia a descarga com 70% de SoC e o processo é interrompido ao atingir 35%, a energia efetivamente utilizada corresponde a apenas 0,49Ah, em comparação com os 0,77Ah que seriam aproveitados em um sistema balanceado. Isso representa uma redução de aproximadamente 36,4% na capacidade utilizável do pack, como pode ser observado na equação 6.1, abaixo, em que $C_p(\%)$ representa a capacidade perdida do Pack de baterias.

$$C_p(\%) = \frac{0,77 - 0,49}{0,77} \cdot 100 = 36,4\% \tag{6.1}$$

No teste em que o balanceamento se encontra ativo, após a células serem totalmente equalizadas, é possível observar o comportamento uniforme das células durante o processo de carga e descarga, como se observa na Figura 40. Essa melhoria é evidenciada no tempo total de descarga: enquanto o pack desbalanceado (sem balanceamento) esgotou sua capacidade útil em 22,8 minutos, o sistema balanceado operou por 35,4 minutos sob as mesmas condições de corrente (1C = 1,4 A). Isso representa um aumento de aproximadamente 52,6% na autonomia do sistema, como pode ser observado na equação 6.2, abaixo, em que $A_{Aut}(\%)$ representa o aumento de autonomia do Pack de baterias.

$$A_{Aut}(\%) = \frac{35,4 - 22,8}{22,8} \cdot 100 = 55,3\% \tag{6.2}$$

Em relação aos indicadores de desempenho apresentados, é importante destacar que a redução de 36,4% refere-se à capacidade da célula não aproveitada (em Ah), decorrente do desbalanceamento entre as células. Por sua vez, o aumento de 55,3% observado na autonomia (tempo de descarga) resulta do uso mais eficiente da energia armazenada após o balanceamento. Embora representem métricas distintas, ambos os indicadores corroboram a relevância da estratégia de equalização adotada.

A análise do processo de equalização realizado pelo SEC e apresentado na Figura 40 também permite avaliar a eficiência do sistema em termos de tempo de equalização. A utilização do resistor de 27 Ω resultou em uma redução de 5% do SoC a cada 46 minutos. Esse valor representa 10 minutos de tempo a mais quando comparado com a estimativa inicial, de 36 minutos, realizada na subseção de Análise Teórica do Desempenho Esperado.

Esse valor representa um erro relativo de 21,73%, e está relacionado as variações de tensão em função do SoC durante o funcionamento da célula e a queda de tensão nos elementos de comutação do circuito do SEC.

6.3 Apresentação dos Resultados da Implementação Experimental

As Figuras 41 e 42 ilustram os resultados experimentais obtidos durante a fase de implementação experimental. A Figura 41 apresenta o resultado obtido durante o teste 1, em que o balanceamento está desabilitado e a Figura 42 apresenta o resultado obtido com o balanceamento habilitado.

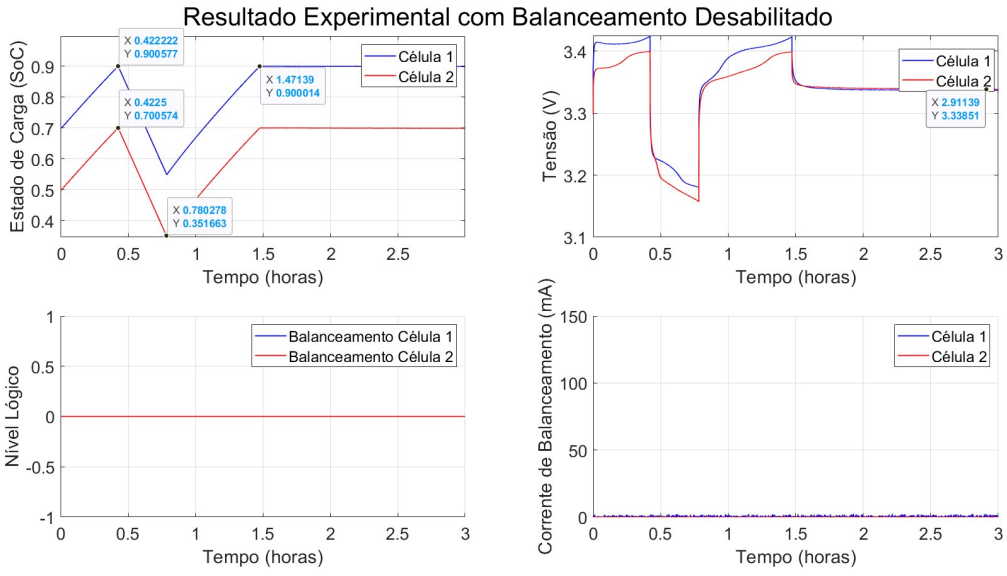


Figura 41 – Resultado Experimental Balanceamento Desabilitado

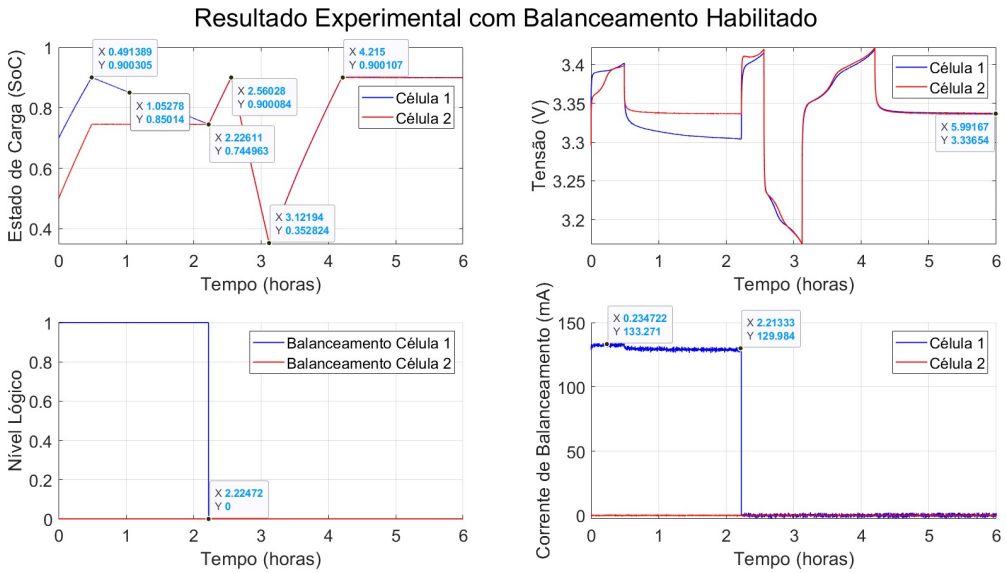


Figura 42 – Resultado Experimental Balanceamento Habilitado

6.4 Discussão e Análise dos Resultados da Implementação Experimental

A análise dos resultados obtidos nos testes experimentais permite concluir que o SEC desenvolvido foi capaz de mitigar o desbalanceamento entre as células do pack de baterias de forma eficaz, uma vez que tanto a lógica de controle quanto o circuito de equalização apresentaram desempenho adequado sob condições reais de operação.

Os resultados experimentais, quando comparados aos obtidos na etapa de simulação, mostram-se consistentes. Os valores dos indicadores de desempenho, apresentados nas Equações 6.1 e 6.2, permanecem inalterados, com perda de 36,4% de capacidade para o teste com o balanceamento desabilitado e aumento de 55,3% na autonomia para o teste com o balanceamento habilitado. Entretanto, a corrente de balanceamento observada apresentou valor médio de 130 mA, mais próxima do valor teórico estimado. Essa corrente foi capaz de drenar 5% de SoC em 34 minutos, dois minutos a menos que os 36 minutos previstos inicialmente na análise teórica do desempenho 5.2.2.4. Esse resultado corresponde a um erro relativo de 5,55%, reduzindo em 16,18% a discrepância em relação ao valor teórico quando comparado ao resultado de simulação, cujo erro relativo foi de 27,73%.

6.5 Apresentação dos Resultados da Implementação em Sistema Embarcado

Os resultados obtidos para os três testes em que o SEC embarcado foi submetido são resumidos pelas Tabelas 17, 18 e 19. A partir das tabelas é possível avaliar o tempo de balanceamento efetivo empregado em cada célula, os valores de tensão e SoC ao final dos testes e o valor das métricas de dispersão de SoC após o balanceamento.

Tabela 17 – Condições e Métricas de Dispersão Após o Balanceamento - Teste 1 (Dispersão de SoC Alta)

Tempo de Balanceamento Empregado por Célula						
Célula	1	2	3	4	5	6
Tempo de Balanceamento (Minutos)	0	80	80	0	240	360

Condições Finais de Tensão			
Célula	Referência (V)	BQ79616 (V)	Erro Absoluto (mV)
1	3,491	3,480	10,750
2	3,502	3,480	21,750
3	3,506	3,480	25,750
4	3,510	3,529	19,268
5	3,507	3,480	26,750
6	3,526	3,529	3,268

Condições Finais de SoC			
Célula	Referência (%)	SEC (%)	Erro Absoluto (%)
1	27,855	26,991	0,864
2	28,750	26,991	1,759
3	29,078	26,991	2,087
4	29,407	31,013	1,606
5	29,160	26,991	2,170
6	30,739	31,013	0,275

Métricas de Dispersão dos valores de SoC do Pack de Baterias		
Métrica	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Referência	4,023	0,86
SEC	4,023	1,89

Tabela 18 – Condições e Métricas de Dispersão Após o Balanceamento - Teste 2 (Dispersão de SoC Moderada)

Tempo de Balanceamento Empregado por Célula						
Célula	1	2	3	4	5	6
Tempo de Balanceamento (Minutos)	0	180	0	0	0	90

Condições Finais de Tensão			
Célula	Referência (V)	BQ79616 (V)	Erro Absoluto (mV)
1	3,839	3,823	15,626
2	3,795	3,774	20,644
3	3,804	3,774	29,644
4	3,827	3,823	3,626
5	3,819	3,823	4,374
6	3,818	3,823	5,374

Condições Finais de SoC			
Célula	Referência (%)	SEC (%)	Erro Absoluto (%)
1	61,211	59,490	1,721
2	56,418	54,227	2,191
3	57,385	54,227	3,158
4	59,887	59,490	0,398
5	59,012	59,490	0,478
6	58,903	59,490	0,587

Métricas de Dispersão dos valores de SoC do Pack de Baterias		
Métrica	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Referência	4,793	1,56
SEC	4,793	2,48

Tabela 19 – Condições e Métricas de Dispersão Após o Balanceamento - Teste 3 (Dispersão de SoC Baixa)

Tempo de Balanceamento Empregado por Célula						
Célula	1	2	3	4	5	6
Tempo de Balanceamento (Minutos)	0	0	0	0	0	80

Condições Finais de Tensão			
Célula	Referência (V)	BQ79616 (V)	Erro Absoluto (mV)
1	3,483	3,480	2,750
2	3,495	3,480	14,750
3	3,499	3,480	18,750
4	3,502	3,480	21,750
5	3,498	3,480	17,750
6	3,487	3,480	6,750

Condições Finais de SoC			
Célula	Referência (%)	SEC (%)	Erro Absoluto (%)
1	27,211	29,991	0,220
2	28,179	29,991	1,189
3	28,505	29,991	1,514
4	28,750	29,991	1,759
5	28,423	29,991	1,433
6	27,532	29,991	0,542

Métricas de Dispersão dos valores de SoC do Pack de Baterias		
Métrica	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Referência	1,539	0,55
SEC	0,000	0,000

6.6 Discussão e Análise dos Resultados da Implementação em Sistema Embarcado

A partir das métricas de dispersão de SoC avaliadas antes e após o processo de balanceamento, é possível verificar a efetividade da equalização realizada pelo SEC embarcado. A análise concentra-se na redução da diferença máxima de SoC entre as células e do desvio padrão dos valores de SoC ao longo dos ensaios. A Tabela 20 apresenta, de forma consolidada, os resultados obtidos.

Com base nos valores observados, conclui-se que o sistema embarcado foi efetivo na redução das métricas de dispersão de SoC, inclusive no teste em que a diferença inicial entre as células já era reduzida. Entretanto, as estimativas envolvidas no cálculo da corrente de balanceamento, no método de determinação de SoC e no arredondamento dos tempos de balanceamento impediram a eliminação completa do desequilíbrio entre as células. Contudo, os resultados obtidos se aproximaram bastante de atingir uma redução completa de desequalização.

Tabela 20 – Análise dos Resultados Obtidos para o SEC Embarcado

Teste 1 - Dispersão de SoC Inicial Alta		
Análise	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Antes do Balanceamento	21,082	7,15
Depois do Balanceamento	4,023	0,86
Variação Δ	17,059	6,29

Teste 2 - Dispersão de SoC Inicial Moderada		
Análise	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Antes do Balanceamento	10,510	3,64
Depois do Balanceamento	4,793	1,56
Variação Δ	5,717	2,08

Teste 3 - Dispersão de SoC Inicial Baixa		
Análise	Máxima Diferença de SoC (%)	Desvio Padrão de SoC (%)
Antes do Balanceamento	3,054	0,91
Depois do Balanceamento	1,539	0,55
Variação Δ	1,515	0,36

7 Conclusões

7.1 Conclusões Gerais

Este trabalho apresentou a implementação e análise de uma estratégia de equalização dissipativa baseada na topologia de resistores de derivação comutados. Para isso, adotou-se uma metodologia estruturada em três etapas progressivas: simulação computacional, implementação experimental em bancada e implementação final em um sistema embarcado dedicado. O estudo foi conduzido com o objetivo de demonstrar os efeitos negativos do desequilíbrio entre células de um pack de baterias de íons de lítio e validar a eficácia da técnica de balanceamento na redução da dispersão de SoC, com consequente recuperação da capacidade utilizável do sistema.

Nas etapas de simulação computacional e implementação experimental (SIL), utilizando um pack de baterias 2S1P com células $LiFePO_4$-18650, foi possível evidenciar que o desbalanceamento entre as células, ainda que moderado (diferença inicial de 20% em SoC), compromete significativamente a autonomia e o aproveitamento energético do sistema. A célula limitante atinge prematuramente os limites operacionais de carga e descarga, resultando em uma redução de aproximadamente 36,4% na capacidade efetivamente utilizada. Em contrapartida, após a equalização das células empregando o SEC desenvolvido em laboratório, foi observado um aumento de aproximadamente 55,3% na autonomia do pack, decorrente da eliminação completa da dispersão de SoC.

A terceira etapa do desenvolvimento buscou avaliar os desafios relacionados à implementação da estratégia proposta em um sistema embarcado. Constatou-se que o desenvolvimento do hardware de monitoramento representa um desafio considerável, tornando mais prática a adoção de circuitos integrados comerciais e direcionando os esforços de desenvolvimento para a lógica de controle a ser embarcada. A utilização da placa BQ79616EVM possibilitou a realização dos ensaios para um SEC embarcado em um pack 6S1P com células NCA-21700. Os resultados demonstraram redução expressiva das métricas de dispersão mesmo em condições de baixo desequilíbrio inicial. Entretanto, a ausência de medição direta da corrente de equalização, somada às aproximações empregadas na estimação do SoC e no tempo de balanceamento, impossibilitou a eliminação completa do desequilíbrio entre as células. Ainda assim, o sistema embarcado permitiu reduzir a máxima diferença de SoC para 1,515% e o desvio padrão para 0,36%, valores considerados baixos para a condição inicial adotada.

Os resultados obtidos ao longo das três etapas de desenvolvimento apresentaram elevada coerência entre si, demonstrando que a técnica estudada é de fácil implementação,

baixo custo e apresenta excelente relação desempenho–complexidade, validando a eficácia da estratégia de balanceamento dissipativo proposta. Por outro lado, destaca-se que tal estratégia apresenta limitações energéticas, uma vez que a equalização é realizada por meio da dissipação de energia.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a implementação e análise de uma estratégia de balanceamento regenerativo, de modo a permitir a comparação sistemática entre ambos os métodos e ampliar a eficiência energética do sistema de equalização.

Referências

Analog Devices. *LTC6813-1 — Multicell Battery Monitor for Stack Voltages up to 18V Datasheet*. 2023. Datasheet. Acessado em: 4 jul. 2025. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc6813-1.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 45.

ARTHANAREESWARAN, J.; LOGANATHAN, A. K. Adaptive passive cell balancing of battery management system for an electric vehicle application. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, World Scientific, v. 32, n. 16, p. 2350278, 2023. Citado na página 41.

BLOMGREN, G. E. The development and future of lithium ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, IOP Publishing, v. 164, n. 1, p. A5019, 2016. Citado na página 21.

CAO, J.; SCHOFIELD, N.; EMADI, A. Battery balancing methods: A comprehensive review. In: *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 36.

CHEN, Y. et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, v. 59, p. 83–99, 2021. ISSN 2095-4956. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495620307075>. Citado na página 21.

Deloitte. *The key role of battery costs in the automotive industry*. 2023. Deloitte Insights. Acessado em: 3 jul. 2025. Disponível em: <https://www.deloitte.com/de/de/Industries/automotive/research/study-key-role-of-battery-costs-in-automotive.html>. Citado na página 35.

DIAS, B. M. d. A. *Processo hierárquico analítico aplicado no controle de sistemas de equalização de carga entre células de baterias de íons de lítio*. Tese (Tese (Doutorado)) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2024. 151 p. Versão original. Citado 3 vezes nas páginas 22, 43 e 58.

DURAISAMY, T.; KALIYAPERUMAL, D. Adaptive passive balancing in battery management system for e-mobility. *International Journal of Energy Research*, Wiley Online Library, v. 45, n. 7, p. 10752–10764, 2021. Citado na página 42.

FENG, F. et al. A review of equalization strategies for series battery packs: variables, objectives, and algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 116, p. 109464, dez. 2019. Citado na página 22.

FERREIRA, P. C. d. L. *Requisitos de Flexibilidade para a Integração em Larga Escala de Energia Solar Fotovoltaica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Coimbra, 2019. Citado na página 22.

FIGUEIRÓ, A. A. *Controle do Balanceamento de Bateria e Estimaçao de Estado de Carga*. Tese (Doutorado) — Ph. D. thesis, 2015. Citado na página 43.

Infineon Technologies AG. *TLE9012DQU — 12-Channel Battery Monitor Datasheet*. 2023. Datasheet. Acessado em: 4 jul. 2025. Disponível em: <https://www.infineon.com/cms/en/product/battery-management-ics/tle9012dqu/>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 45.

ISMAIL, K. et al. Passive balancing battery management system using mosfet internal resistance as balancing resistor. In: IEEE. *2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*. [S.l.], 2017. p. 151–155. Citado na página 42.

JOSSEN, A. Fundamentals of battery dynamics. *Journal of Power Sources*, v. 154, p. 530–538, 2006. Citado na página 22.

KARMAKAR, S.; BOHRE, A. K.; BERA, T. K. Novel pid controller-based passive cell balancing for bms. In: IEEE. *2023 IEEE 3rd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*. [S.l.], 2023. p. 1–4. Citado na página 42.

KIVRAK, S. et al. Battery management system implementation with the passive control method using mosfet as a load. *Measurement and Control*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 53, n. 1-2, p. 205–213, 2020. Citado na página 42.

KOSEOGLOU, M. et al. Highly effective cell equalization in a lithium-ion battery management system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 35, n. 2, p. 2088–2099, 2019. Citado na página 41.

KUSIAK, R. S. Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio íon polímero a partir de modelos híbridos considerando correntes de descarga variáveis. 2016. Citado na página 27.

Li-Polymer Battery Co. *21700 Battery Cell 3.7V 4800mAh – Datasheet*. 2021. Acessado em: 3 jul. 2025. Disponível em: <https://www.li-polymer-battery.com/wp-content/uploads/2021/11/21700-Battery-Cell-3.7V-4800mAh-Datasheet.pdf>. Citado na página 32.

LU, L. et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, v. 226, p. 272–288, 2013. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312016163>. Citado 9 vezes nas páginas 22, 23, 31, 33, 35, 37, 38, 39 e 45.

MOHAMMADI, F.; SAIF, M. A comprehensive overview of electric vehicle batteries market. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, v. 3, p. 100127, 2023. ISSN 2772-6711. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671123000220>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

Nobel Prize Outreach. *The Nobel Prize in Chemistry 2019*. 2019. Acesso em: 4 abr. 2025. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/summary/>. Citado na página 21.

PLETT, G. *Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 9 vezes nas páginas 29, 30, 31, 33, 35, 36, 37, 38 e 45.

PLETT, G. L. *Battery management systems, Volume I: Battery modeling*. [S.l.]: Artech House, 2015. Citado na página 37.

SAE Brasil. *Fórmula SAE Brasil — Programa Estudantil*. 2025. <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil/>. Acessado em: 02 dez. 2025. Citado na página 73.

SANTOS, P. C. D. et al. *Métodos para a estimativa da capacidade de baterias estacionárias com ênfase em aplicações de segurança*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 35.

SANTOS, S. R. D. et al. Dissipative lithium-ion cell balancing by recharge control and detection of outliers for energy optimization and heat reduction. In: IEEE. *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2018. p. 5038–5043. Citado na página 41.

Silicon Lightworks. *Li-Ion Battery Voltage Chart (Fully Charged & Discharged)*. 2024. Website. Acessado em: 4 jul. 2025. Disponível em: <https://siliconlightworks.com/li-ion-voltage>. Citado na página 47.

SOLíS, C. A. V. *Identificação do Modelo Matemático e Estimação do Estado de Carga de Baterias de Íons de Lítio Utilizando um Filtro de Kalman Estendido*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2025. Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos, ENM/FT/UnB. Citado 3 vezes nas páginas 34, 53 e 78.

STMicroelectronics. *L9963E — Automotive Battery Cell Monitoring IC Datasheet*. 2023. Datasheet. Acessado em: 4 jul. 2025. Disponível em: <https://www.st.com/en/automotive-analog-and-power/l9963e.html>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 45.

Strema Baterias. *Bateria $LiFePO_4$ 18650 3,2V 1400mAh — Datasheet*. 2025. Folha de dados online. Acessado em: 4 jul. 2025. Disponível em: <https://stremabaterias.com.br/produto/estoque/142/66/li-fepo4-18650-32v-1400mah/>. Citado na página 52.

STRINGARI, D. et al. Estudo e desenvolvimento de um bms para baterias de íon-lítio. Joinville, SC, 2020. Citado na página 43.

Texas Instruments. *BQ79616-Q1 — Battery Monitor With Stack Balancing and Protections Datasheet*. 2023. Folha de dados (datasheet). Acessado em: 4 jul. 2025. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq79616-q1.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 39, 45 e 73.

Texas Instruments. *BQ79616EVM-021 Evaluation Module User's Guide*. [S.l.], 2023. Acessado em: 31 dez. 2024. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ug/sluuc37d/sluuc37d.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 74.

Texas Instruments. *SPNS192B – Datasheet*. [S.l.], 2024. Acessado em: 02 dez. 2024. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/spns192b/spns192b.pdf>. Citado na página 75.

ULUCAN, T.; BURAT, F. The recent developments in ev batteries and rees recovery processes from spent nimh batteries. *Academia Engineering*, Academia. edu Journals, v. 1, n. 4, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

VITOLS, K. Design of an embedded battery management system with passive balancing. In: IEEE. *2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC)*. [S.l.], 2014. p. 142–146. Citado na página 41.

WEI, L. et al. Study on passive balancing characteristics of serially connected lithium-ion battery string. In: IEEE. *2017 13th IEEE international conference on electronic measurement & instruments (ICEMI)*. [S.l.], 2017. p. 489–495. Citado na página 43.

WEICKER, P. *A systems approach to lithium-ion battery management*. [S.l.]: Artech house, 2013. Citado 8 vezes nas páginas 22, 23, 29, 30, 31, 36, 37 e 45.

WU, L. et al. A multi-module equalization system for lithium-ion battery packs. *International Journal of Energy Research*, Wiley Online Library, v. 46, n. 3, p. 2771–2782, 2022. Citado na página 42.

XU, J.; MEI, X.; WANG, J. A high power low-cost balancing system for battery strings. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 158, p. 2948–2953, 2019. Citado na página 58.